

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

**Departamento de Organización de Empresas,
Economía Financiera y Contabilidad**



**“COORDINACIÓN DE INVENTARIOS EN UNA CADENA DE SUMINISTRO
A TRAVÉS DE ÉPOCAS COMUNES DE RESURTIDO BAJO DEMANDA
DINÁMICA CONSIDERANDO DIVERSOS MODOS DE TRANSPORTE Y
DIFERENTES POLÍTICAS DE DESCUENTO EN LOS PRECIOS DE LOS
PRODUCTOS Y EN LAS TARIFAS DE TRANSPORTE”**

TESIS DOCTORAL

José Elías Jiménez Sánchez

Directores:

Dr. Juan Gaytán Iniestra

Dr. José Pedro García Sabater

Valencia, 2006

A la memoria de mi abuelita:
Doña Guillermina Sánchez Moreno †
(1916-2004)

Agradecimientos

Por supuesto esta tesis no hubiese sido posible sin el apoyo incondicional del Dr. Juan Gaytán Iniestra, quién sin limitación alguna me ha compartido sus amplios conocimientos, y sobre todo su bondad, los cuales han sido la guía y el soporte más importante para allanar el camino para la realización de esta tesis.

Además de haber ganado un gran amigo, asimismo quiero agradecer al Dr. José Pedro García Sabater, por su gran interés en el tema y sus importantísimos consejos durante la elaboración de la tesis, los cuales permitieron mejorar substancialmente la misma y terminarla de forma satisfactoria.

Mi más alto reconocimiento al Dr. Francisco Lario Esteban por su gran esmero y dedicación en la formación de cuadros del más alto nivel, en los que de alguna manera, sin saber como lo hice, pero me pude filtrar participando en sus interesantes proyectos académicos; gracias Dr. Lario.

Una de mis mayores satisfacciones fue haber podido interactuar con verdaderos expertos en este campo de la investigación y en particular del tema de la gestión de la cadena de suministro, y me refiero a mis evaluadores, los Doctores: Ramón Companys Pascual, Sebastián Lozano Segura, José Manuel Framiñán Torres y Carlos Andrés Romano, a quienes les agradezco haber dedicado una parte de su valioso tiempo a la lectura de este trabajo.

En general, quiero hacer patente mi reconocimiento a la comunidad española estudiantil, compañeros de Doctorado, profesores y demás, que la estancia realizada en Valencia, España, se convirtió en una experiencia inolvidable que con mucho gusto volvería a repetir.

Asimismo, quiero dar las gracias al Dr. Octavio Rascón Chávez, Director General del Instituto Mexicano del Transporte, por su confianza y gran apoyo en la realización de este mi proyecto de vida. De manera especial, brindo mi gratitud al M en I Tristan Ruiz Lang, por la fe y optimismo que siempre avivó en mi persona. Al M en E Víctor Islas por su mediación en la materialización de este esfuerzo. A Gaby de Jesús Zea, me satisface reconocerle su gran compromiso y dedicación, haciendo que muchas de mis actividades se realizarán con el tiempo y dedicación que exigían. Mención destacada merecen también el Comité de Becas del IMT por su activa participación en mi proceso, en especial al M en I Ramón Cervantes, a mi maestro en la investigación el Dr. Alberto Mendoza, al Ing. Rodolfo Tellez y la M en I Martha Lelis en la parte operativa.

Por último, y no menos importante, quiero hacer patente mi más profunda gratitud a mi familia por su comprensión y cariño, sin los cuales el trabajo hubiese resultado mucho más ingrato y difícil de lo que en realidad fue. Sin embargo, debido a que no les puedo asegurar que este será el último trabajo intenso en el cual participare, nuevamente les doy las gracias y espero aún contar con su amable comprensión: gracias Rosario, Irving y Jocelyn. A mi familia política, gracias por todo: en especial a Don José, Doña Abigail, María, Fani y Samuel. A mis padres, Don Elías y Doña Ernestina, me resta sólo decirles que se sientan orgullosos porque no los defraudaré.

Por otro lado, quiero hacer un reconocimiento a las Instituciones que participaron en este proyecto, entre las que destacan:

El Instituto Mexicano del Transporte el cual me otorgó la beca principal y el tiempo necesario para la realización de mis estudios.

La Universidad Politécnica de Valencia y la Universidad de Guanajuato, las cuales con sus novedosos convenios de exportación del conocimiento, hicieron posible la formulación del programa doctoral, por demás interesante en "Gestión de la Cadena de Suministro e Integración Empresarial".

Al Departamento de Organización de Empresas, Economía Financiera y Contabilidad de la Universidad Politécnica de Valencia, por su gran apoyo en los trámites administrativos relacionados con el programa doctoral.

Al área de Acción Internacional de la Universidad Politécnica de Valencia, por su magnifico apoyo en las estancias doctorales realizadas en Valencia, España.

El Centro de Vinculación con el Entorno de la Universidad de Guanajuato, que coordinó de manera atinada en México todos los eventos relacionados con el programa.

A la Universidad Autónoma del Estado de México por apoyarme en la adquisición de libros, equipo y el software necesario para la elaboración de los experimentos.

Finalmente, es importante darle las gracias a la empresa de autopartes que proporciono la información para llevar a cabo la aplicación de los modelos, quienes por motivos de confidencialidad prefieren mantenerse en el anonimato.

*A todos, muchas gracias: José Elías Jiménez Sánchez
Noviembre 20, de 2006.
(Día de la Revolución Mexicana de 1910)*

“Coordinación de inventarios en una cadena de suministro a través de
Épocas Comunes de Resurtido bajo demanda dinámica considerando
diversos modos de transporte y diferentes políticas de descuento en
los precios de los productos y en las tarifas de transporte”

Índice

Índice	i
Cuadros	ix
Figuras	xii
Resumen	xix
Resum	xx
Abstract.....	xxi

Capítulo 1 Introducción

1.1 Presentación.....	1
1.2 Preguntas de investigación	3
1.3 Objetivo general	5
1.4 Justificación.....	6
1.5 Alcance	6
1.6 Contexto general de los modelos propuestos	7
1.7 Metodología.....	8
1.8 Esquema general de la tesis	10
Referencias	12

Capítulo 2 Marco teórico conceptual de la coordinación en la cadena de suministro

2.1 Introducción.....	15
2.1.1 Gestión de la cadena de suministro	16
2.1.2 Problemas y barreras de gestión	19
2.1.3 Modelos de gestión de la cadena de suministro	22
2.2 Coordinación de la gestión logística de la cadena de suministro	24
2.2.1 El concepto “Coordinación”	24
2.2.2 Las relaciones de colaboración, como elemento facilitador de la coordinación de la cadena de suministro	27
2.2.3 Integración empresarial, facilitador de la coordinación de los procesos clave en la cadena de suministro	29
2.2.4 Medio ambiente operativo de la coordinación empresarial.....	31
2.2.5 Mecanismos de coordinación empresarial.....	34

2.2.6	Estrategias de coordinación en la cadena de suministro.....	36
2.2.7	Estrategias de coordinación para la gestión de inventarios	40
2.2.7.1	Estrategia de desarrollo conjunto de órdenes (<i>DCO</i>)	41
2.2.7.2	Estrategia “Justo a Tiempo” (<i>JIT: Just in Time</i>)	41
2.2.7.3	Respuesta Rápida (<i>QR: Quick Response</i>)	42
2.2.7.4	Estrategia de Reaprovisionamiento Eficiente (<i>ER: Efficient Replenishment</i>)	43
2.2.7.5	Reaprovisionamiento Continuo (<i>CR: Continuous Replenishment</i>)	45
2.2.7.6	Planeación, Pronóstico y Reabastecimiento Colaborativo (<i>CPFR: Collaborative Planning, Forecasting and Replenishment</i>) ...	46
2.2.7.7	Inventario Administrado por el Proveedor (<i>VMI: Vendor Managed Inventory</i>).....	47
2.2.7.8	Estrategia “Gestión de la Disponibilidad por el Proveedor” (<i>SMA: Supplier Managed Availability</i>)	49
2.2.7.9	Estrategia “Épocas Comunes de Resurtido” (<i>ECR</i>) (<i>CRE: Common Replenishment Epochs</i>).....	50
2.3	Coordinación de inventarios en la cadena de suministro	50
2.3.1	Sistema jerárquico de inventarios en la cadena de suministro	52
2.3.2	Relevancia de la coordinación cliente-proveedor en el sistema de inventarios	56
2.3.3	Modelos de coordinación centralizada y descentralizada cliente-proveedor	58
2.4	Gestión de Inventarios	61
2.4.1	Problemática y relevancia de los inventarios	61
2.4.2	Los costes relevantes del inventario	63
2.4.3	El modelo básico para la gestión de inventarios.....	65
2.5	Gestión y operación del transporte	69
2.5.1	Importancia del transporte en la cadena de suministro.....	69
2.5.2	Transporte combinado y la importancia de su coordinación.....	72
2.5.3	Los factores relevantes del transporte multimodal	75
2.5.4	Evaluación y selección de las cadenas multimodales de transporte.....	78
2.5.4.1	Análisis del intercambio (<i>trade-off</i>) coste-nivel de servicio entre las alternativas de transporte.....	79
2.5.4.2	Evaluación competitiva de las opciones multimodales de transporte ...	80
2.6	El transporte en la cadena suministro y su influencia en el sistema de los inventarios	81
2.6.1	El sistema de inventario y su relación con el transporte	82

2.6.2	El inventario y los costes del transporte	85
2.6.2.1	El tamaño del pedido y su impacto en el coste de transporte	86
2.6.2.2	Coste de transporte considerando restricciones de capacidad	89
2.6.2.3	Impacto del coste de transporte en el precio de venta según el tipo de <i>Incoterm</i>	93
2.6.2.4	Envíos en “ <i>contenedor completo</i> ” (FCL) contra “ <i>contenedor consolidado</i> ” (LCL) y sus implicaciones en los costes de transporte	95
2.6.2.5	Relación del modo de transporte y la política de pedido.....	97
2.7	Conclusiones.....	99
	Referencias	102

Capítulo 3 Modelos matemáticos para la coordinación de los inventarios: Estado del Arte

3.1	Introducción.....	113
3.2	Generalidades de los modelos de inventarios.....	114
3.3	Planteamiento general del problema de coordinación de inventarios.....	115
3.3.1	Política individual del cliente	116
3.3.2	Política individual del proveedor.....	117
3.3.3	Política conjunta de coordinación cliente-proveedor	118
3.4	Estructuras básicas de los modelos de coordinación de inventarios.....	121
3.4.1	Coordinación entre un proveedor y un cliente.....	121
3.4.2	Coordinación entre un proveedor y múltiples clientes	129
3.4.3	Coordinación entre múltiples proveedores y un cliente	133
3.4.4	Coordinación entre más de dos eslabones de la cadena de suministro.....	134
3.4.5	Características principales de los modelos de coordinación de inventarios.....	136
3.5	Modelos de coordinación de inventarios considerando las variables fundamentales del transporte	138
3.5.1	Coordinación entre un proveedor y un cliente.....	140
3.5.2	Coordinación entre un proveedor y varios clientes	169
3.5.3	Características principales de los modelos de coordinación de inventarios considerando las variables fundamentales del transporte.....	182
3.6	Conclusiones.....	184
3.6.1	Sobre los modelos de coordinación de inventarios	184

3.6.2 Sobre los modelos de inventarios y las variables fundamentales del transporte	187
Referencias	189

Capítulo 4 El sector de la automoción y su gestión en el suministro de las autopartes

4.1 Introducción.....	193
4.2 Tendencias recientes del sector de la automoción.....	194
4.2.1 Dinámica de los mercados internacionales.....	194
4.2.2 Los factores del mercado que han revolucionado el sector.....	199
4.2.3 Estrategias de los ensambladores de automóviles	203
4.3 La cadena de suministro del sector de la automoción	206
4.3.1 Estructura y dimensiones de la cadena	207
4.3.2 Proveedores directos o de primer nivel	212
4.3.3 Proveedores indirectos o sub-proveedores (segundo nivel, y subsecuentes)	214
4.3.4 Redefinición de los proveedores y nuevos conceptos	218
4.3.5 El control de la cadena a través de los contratos	219
4.4 Gestión del suministro en el sector de la automoción	221
4.4.1 Relaciones espaciales y el abasto de componentes y autopartes	221
4.4.2 Las relaciones fabricante-proveedor y su efecto en el suministro.....	226
4.4.3 El aprovisionamiento ajustado y el programado	230
4.5 El sector de la automoción en México	238
4.5.1 La industria terminal.....	242
4.5.2 El sector de las autopartes	246
4.5.3 Operatividad del mercado mexicano	253
4.6 Conclusiones.....	257
Referencias	263

Capítulo 5 Modelos propuestos para la coordinación de inventarios utilizando diversos modos de transporte para el abastecimiento

5.1 Introducción.....	269
5.2 Modelos de referencia para la coordinación de inventarios	272
5.2.1 Modelo de Viswanathan y Piplani (2001).....	273
5.2.2 Modelo de Chang y Tsai (2002).....	277
5.2.3 Modelo de Reyes y Gaytán (2003).....	280
5.2.4 Sinopsis de los modelos analizados.....	286

5.3	Fundamentos teóricos	292
5.3.1	Teoría de juegos en el sistema de abastecimiento	293
5.3.1.1	Modelos de Oligopolio	295
5.3.1.2	El modelo de Stackelberg en la gestión de inventarios	296
5.3.2	La producción y el balance de los inventarios.....	298
5.3.3	El algoritmo de Wagner y Whitin.....	301
5.4	Exposición y planteamiento del problema de estudio	303
5.4.1	Visión general del problema.....	304
5.4.2	La cadena de suministro y la cadena de transporte	305
5.4.3	Los costes y las medidas de desempeño.....	306
5.4.4	La coordinación de los inventarios y el uso combinado del transporte en el contexto internacional.....	308
5.4.4.1	<i>Incoterm Ex Work</i> -en fábrica-	310
5.4.4.2	<i>Incoterm DDP (Delivery Duty Paid)</i> –en el local del cliente-	311
5.4.5	El concepto de eficiencia de la combinación modal.....	313
5.4.6	Planteamiento del problema desde el punto de vista multicriterio.....	315
5.5	Formulación de los modelos para la coordinación de inventarios utilizando la estrategia ECR	320
5.5.1	Modelo semántico	321
5.5.2	Formulación matemática de los modelos	323
5.5.2.1	Supuestos	323
5.5.2.2	Notación empleada en la formulación matemática	325
5.5.2.2.1	Parámetros del modelo	326
5.5.2.2.2	Variables de decisión.....	326
5.5.3	Formulación del problema sin coordinación	327
5.5.4	Formulación del problema coordinado en el contexto del <i>Inconterm ExW</i>	329
5.5.5	Modelado de la coordinación “ <i>Épocas Comunes de Resurtido</i> ” (<i>ECR</i>)	331
5.5.6	Formulación del problema coordinado en el contexto del <i>Inconterm DDP</i>	333
5.5.7	Tipificación de los modelos propuestos	336
5.6	Conclusiones	338
	Referencias	341
Capítulo 6 Elección del método de solución de problemas multiobjetivo y diseño del esquema de modelado		
6.1	Introducción.....	345
6.2	Conceptos fundamentales	346

6.2.1	Soluciones no dominadas	348
6.2.2	Propiedades de la relación de dominancia.....	350
6.2.3	Definición del conjunto no dominado	351
6.2.4	Eficiencia.....	352
6.2.5	Definición del óptimo Pareto y su frontera	353
6.2.6	Intercambios (<i>Trade off</i>).....	354
6.2.7	Objetivos sin conflicto.....	354
6.2.8	Vector débilmente no dominado	355
6.2.9	Vector ideal de los objetivos	355
6.2.10	Vector objetivo utópico	357
6.2.11	La matriz de pagos.....	358
6.2.12	Otras definiciones relevantes.....	359
6.2.13	Métodos de solución en la programación multiobjetivo	360
6.2.14	Generación de soluciones no dominadas.....	360
6.2.15	Función lineal escalada.....	361
6.2.16	Función escalada tipo Tchebycheff	361
6.3	Clasificación de métodos de solución de problemas multiobjetivo	363
6.3.1	Técnicas que requieren "a priori" una definición de las preferencias por parte del tomador de decisiones.....	365
6.3.1.1	Método de la función de valor (utilidad).....	365
6.3.1.2	Método de orden lexicográfico.....	366
6.3.1.3	Programación por metas (Charnes y Cooper, 1961)	367
6.3.1.4	Programación por metas lexicográficas.....	368
6.3.1.5	Método de los intercambios de valor y las tasas marginales de sustitución (<i>SWT, Surrogate Worth Trade-off</i>)	369
6.3.1.6	Conclusión final sobre esta clase de métodos	370
6.3.2	Técnicas que requieren "a posteriori" una definición progresiva de las preferencias por parte del centro decisor.....	371
6.3.2.1	Método de los pesos (Zadeh, 1963).....	371
6.3.2.2	Método de las restricciones	373
6.3.2.3	Método del criterio global (Zeleny, 1973).....	375
6.3.2.4	Conclusión general de estos métodos.....	377
6.3.3	Técnicas que requieren una definición progresiva de las preferencias por parte del tomador de decisiones.....	377
6.3.3.1	Método STEP o STEM (Benayoun, de Montgolfier, Tergny y Larichev, 1971)	378

6.3.3.2	Método de Geoffrion (GDF) (Geoffrion-Dyer-Feinberg, 1972).....	380
6.3.3.3	Método Z-W (Zionts-Wallenius, 1976).....	383
6.3.3.4	Método SEMOPS (<i>Sequential Multiobjective Problem Solving</i>).....	385
6.3.3.5	Método de intercambio del valor de las sustituciones (ISWT) (Chankong y Haimes, 1978 y 1983).....	386
6.3.3.6	Método interactivo de Thebycheff (Steuer y Choo, 1986).....	388
6.3.3.7	Método de Dirección de Referencia para problemas de programación múltiples objetivos lineal entero (MOILP). (Vassilev y Narula, 1993).....	390
6.3.3.8	Método NIMBUS (<i>Nondifferentiable Interactive Multiobjective Burdel-based optimization System</i>). (Miettinen y Mäkelä, 1996).....	393
6.4	Perfil del algoritmo general de los métodos de solución de MOLP.....	395
6.5	Selección del método de solución multiobjetivo.....	397
6.5.1	Criterios de selección	398
6.5.2	Elección del método	399
6.6	Metodología para la solución de los modelos propuestos	401
6.7	Conclusiones.....	402
	Referencias	404

Capítulo 7 Aplicación de los modelos propuestos a una empresa del sector de las autopartes: Análisis numérico

7.1	Introducción.....	407
7.2	Marco empírico	408
7.2.1	La empresa proveedora.....	408
7.2.1.1	Los productos	410
7.2.1.2	Autopartes para la suspensión: rótulas y estabilizadores.....	410
7.2.1.3	Autopartes para la suspensión: mazas	411
7.2.2	Servicios Logísticos proporcionados por el Operador Logístico, SA (OLSA)	411
7.2.2.1	Características de los flujos de abasto	412
7.2.2.2	El proceso de adquisición del cliente (proveedor de primer nivel)	413
7.2.2.3	Flujos de abasto en el mercado internacional y doméstico	413
7.2.2.4	Términos del comercio internacional (<i>Incoterms</i>)	415
7.2.3	Empresa cliente bajo estudio	415

7.2.3.1	Productos seleccionados y demanda anual.....	415
7.2.3.2	Costes por ordenar y de almacenamiento.....	416
7.2.3.3	Costes y modos de transporte utilizados.....	418
7.2.3.4	Distancia y tiempo de entrega.....	420
7.2.3.5	Coste de inventario en tránsito.....	420
7.2.4	Parámetros de los modelos.....	422
7.3	Diseño de la experimentación.....	425
7.3.1	Descripción de los escenarios de evaluación.....	427
7.3.2	Medidas de desempeño para evaluar los beneficios de la estrategia ECR.....	430
7.4	Análisis operativo de los modelos y comparación de las fronteras Pareto.....	431
7.4.1	Análisis operativo del modelo y frontera Pareto. Escenario 0.....	432
7.4.2	Análisis operativo del modelo y frontera Pareto. Escenario 1.....	435
7.4.3	Análisis operativo del modelo y frontera Pareto. Escenario 2.....	438
7.4.4	Análisis operativo del modelo y frontera Pareto. Escenario 3.....	440
7.4.5	Análisis operativo del modelo y frontera Pareto. Escenario 4.....	442
7.4.6	Análisis operativo del modelo y frontera Pareto. Escenario 5.....	444
7.4.7	Análisis operativo del modelo y frontera Pareto. Escenario 6.....	446
7.5	Análisis de las soluciones no dominadas en torno a los beneficios logrados con la estrategia ECR.....	449
7.5.1	Alternativas no dominadas. Escenario 1.....	449
7.5.2	Alternativas no dominadas. Escenario 2.....	459
7.5.3	Alternativas no dominadas. Escenario 3.....	467
7.5.4	Alternativas no dominadas. Escenario 4.....	474
7.5.5	Alternativas no dominadas. Escenario 5.....	484
7.5.6	Alternativas no dominadas. Escenario 6.....	489
7.6	Uso combinado y costes del transporte por tipo de <i>Incoterm</i>	493
7.7	Soluciones no dominadas creadas con el método interactivo de Vassilev y Narula.....	498
7.7.1	Operativa del método interactivo para encontrar soluciones no dominadas.....	498
7.7.2	Soluciones no dominadas reveladas con el método interactivo en el contexto del <i>Incoterm</i> ExW.....	500
7.7.3	Soluciones no dominadas reveladas con el método interactivo en el contexto del <i>Incoterm</i> DDP.....	501
7.8	Conclusiones.....	502
	Referencias.....	504

Capítulo 8 Conclusiones y líneas de futuro de investigación

8.1	Introducción.....	507
8.2	Conclusiones sobre el problema de la coordinación de los inventarios	507
8.3	Conclusiones acerca de las preguntas de investigación o hipótesis	510
8.3.1	Pregunta de investigación 1	510
8.3.2	Pregunta de investigación 2.....	512
8.3.3	Pregunta de investigación 3.....	513
8.3.4	Pregunta de investigación 4.....	514
8.4	Implicaciones para la teoría.....	514
8.5	Implicaciones para las políticas y prácticas.....	515
8.6	Limitaciones	516
8.7	Líneas futuras de investigación	517
	Referencias	518

Cuadros

Cuadro 2.1	Problemas de gestión de la cadena de suministro a nivel estratégico	20
Cuadro 2.2	Problemas de gestión de la cadena de suministro a nivel táctico.....	21
Cuadro 2.3	Problemas de gestión de la cadena de suministro a nivel operativo	22
Cuadro 2.4	Costes relevantes con acuerdo típico y bajo una política de abasto a consignación	48
Cuadro 2.5	Elección y evaluación de rutas multimodales no dominadas	81
Cuadro 2.6	Costes de transporte por tipo de <i>Incoterm</i>	94
Cuadro 2.7	Impacto en el precio de las mercancías por tipo de <i>Incoterm</i>	95
Cuadro 3.1	Características principales de los modelos de coordinación de inventarios.....	137
Cuadro 3.2	Características principales de los modelos de coordinación de inventarios considerando las variables fundamentales del transporte.....	183
Cuadro 4.1	Participación porcentual en la producción mundial de automóviles en los países seleccionados	196
Cuadro 4.2	Ventas mundiales de automóviles por región (miles de unidades).....	197
Cuadro 4.3	Participación mundial de las ventas anuales de automóviles para los países seleccionados	198
Cuadro 4.4	Industria Terminal en México	242

Cuadro 4.5	Participación de México en la exportación mundial de autopartes.....	250
Cuadro 4.6	Valor de la producción en la industria autopartes por clase de actividad para automóviles y camiones	252
Cuadro 4.7	Apoyos que reciben los proveedores del segundo nivel de los del primero	254
Cuadro 5.1	Resumen de las características de los modelos de referencia.....	292
Cuadro 5.2	Características de los modelos propuestos	338
Cuadro 5.3	Comparación de las características de los modelos de referencia y los modelos propuestos.....	339
Cuadro 7.1	Precio y demanda anual de los productos seleccionados para el estudio.....	416
Cuadro 7.2	Coste por ordenar	417
Cuadro 7.3	Coste unitario de almacenamiento por tipo de producto	418
Cuadro 7.4	Porcentaje del coste logístico de transporte y coste promedio de transporte por componente movilizado entre México y Alemania	419
Cuadro 7.5	Tiempo de viaje y velocidad de entrega como atributo principal del nivel de servicio del transporte.....	420
Cuadro 7.6	Coste unitario de inventario en tránsito para los productos seleccionados	421
Cuadro 7.7	Parámetros del modelo	422
Cuadro 7.8	Demanda del cliente por tipo de componente o producto seleccionado (en miles)	423
Cuadro 7.9	Características de los datos de la demanda.....	423
Cuadro 7.10	Coste de compra o adquisición.....	424
Cuadro 7.11	Dimensiones del problema y tiempo de ejecución	425
Cuadro 7.12	Costes totales de transporte	426
Cuadro 7.13	Resumen de comparación de los escenarios propuestos	429
Cuadro 7.14	Costes del cliente-proveedor no coordinados (Soluciones no dominadas).....	433
Cuadro 7.15	Estructura de costes del cliente no coordinado.....	434
Cuadro 7.16	Costes del cliente coordinado en el contexto del <i>Incoterm ExW</i> (Escenario 1: Soluciones no dominadas)	450
Cuadro 7.17	Descuento total en el precio de los productos (Escenario 1: valor de las z_{ij})	451
Cuadro 7.18	Ahorros o pérdidas del cliente en el contexto del <i>Incoterm ExW</i> (Escenario 1)	452

Cuadro 7.19	Costes del proveedor coordinado en el contexto del <i>Incoterm ExW</i> (Escenario 1)	453
Cuadro 7.20	Ahorros o pérdidas del proveedor en el contexto del <i>Incoterm ExW</i> (Escenario 1)	455
Cuadro 7.21	Ahorros y pérdidas del sistema y nivel de servicio del transporte en el contexto del <i>Incoterm ExW</i> (Escenario 1).....	456
Cuadro 7.22	Ahorros o pérdidas del cliente en el contexto del <i>Incoterm ExW</i> (Escenario 2)	460
Cuadro 7.23	Estructura de costes del cliente no coordinado (Escenario 2)	461
Cuadro 7.24	Estructura de costes del cliente coordinado en el contexto del <i>Incoterm ExW</i> (Escenario 2)	462
Cuadro 7.25	Ahorros o pérdidas del proveedor en el contexto del <i>Incoterm ExW</i> (Escenario 2)	463
Cuadro 7.26	Coste total del sistema coordinado y nivel de servicio del transporte en el contexto del <i>Incoterm ExW</i> (Escenario 2).....	465
Cuadro 7.27	Ahorros y pérdidas del sistema y nivel de servicio del transporte	468
Cuadro 7.28	Costes del cliente bajo el <i>Incoterm ExW</i> (Escenario 3)	471
Cuadro 7.29	Ahorros o pérdidas del proveedor (Escenario 3).....	472
Cuadro 7.30	Estructura de costes del cliente coordinado (Escenario 3)	473
Cuadro 7.31	Costes del proveedor en el contexto del <i>Incoterm DDP</i> (Escenario 4)	475
Cuadro 7.32	Descuento total en el precio de los productos en el contexto del <i>Incoterm DDP</i> (Escenario 4).....	476
Cuadro 7.33	Ahorros o pérdidas del cliente bajo el <i>Incoterm DDP</i> (Escenario 4)	478
Cuadro 7.34	Estructura de costes del cliente (Escenario 4)	479
Cuadro 7.35	Ahorros y pérdidas del proveedor bajo el <i>Incoterm DDP</i> (Escenario 4)	480
Cuadro 7.36	Coste total del sistema coordinado y nivel de servicio del transporte (Escenario 4).....	482
Cuadro 7.37	Coste total del sistema y nivel de servicio del transporte (Escenario 5).....	485
Cuadro 7.38	Ahorros o pérdidas de cliente (Escenario 5).....	487
Cuadro 7.39	Estructura de costes del cliente (Escenario 5)	488
Cuadro 7.40	Ahorros o pérdidas del proveedor (Escenario 5).....	489
Cuadro 7.41	Coste total del sistema y nivel de servicio del transporte (Escenario 6).....	490
Cuadro 7.42	Ahorro o pérdidas del cliente (Escenario 6)	491
Cuadro 7.43	Ahorros o pérdidas del proveedor (Escenario 6).....	492

Cuadro 7.44 Coste y nivel de servicio del transporte por tipo de <i>Incoterm</i> (Escenario 6).....	494
---	-----

Figuras

Figura 1.1 Marco metodológico para el desarrollo de la propuesta de investigación.....	9
Figura 2.1 Relación de los modelos de gestión en la cadena de suministro	23
Figura 2.2 Taxonomía de la coordinación	26
Figura 2.3 Factores de colaboración e integración empresarial.....	28
Figura 2.4 Proceso típico de reaprovisionamiento eficiente entre proveedor y cliente	44
Figura 2.5 Estrategias <i>VMI</i> y <i>SMA</i>	50
Figura 2.6 Características principales de la estrategia “ <i>Épocas Comunes de Resurtido</i> ”	51
Figura 2.7 Tipos de inventario	53
Figura 2.8 Ejemplo de configuraciones de cadena de suministro multi-eslabón.....	54
Figura 2.9 Segmento de estudio de la cadena de suministro	56
Figura 2.10 Disponibilidad de inventario con demanda constante	66
Figura 2.11 Nivel de inventario versus frecuencia de ordenar	67
Figura 2.12 Inventario anual y costes por ordenar como una función del tamaño del pedido.....	68
Figura 2.13 Relación del transporte y el inventario en las etapas de abastecimiento y distribución	71
Figura 2.14 Alternativa unimodal	76
Figura 2.15 Transporte combinado Autotransporte-Ferrocarril.....	76
Figura 2.16 Transporte Combinado Autotransporte-Ferrocarril-Marítimo	76
Figura 2.17 Transporte multimodal desde el origen hasta el destino.....	76
Figura 2.18 Óptimo de Pareto para la elección de rutas multimodales de carga	79
Figura 2.19 Relación del tamaño del envío y su coste de transporte	87
Figura 2.20 Punto de equilibrio de los costes de transporte.....	87
Figura 2.21 Esquema 1. Incorporación del coste de transporte al precio de compra	89
Figura 2.22 Esquema 2. Incorporación del coste de transporte al precio de compra	90
Figura 2.23 Esquema 3. Incorporación del coste de transporte al precio de compra	90
Figura 2.24 Punto de inflexión del ratio de los costes FCL y LCL	96
Figura 2.25 Efecto en el coste de transporte por una mejora en el sistema de consolidación de carga	97

Figura 2.26	Relación entre el tamaño del pedido y su coste por diferentes modos de transporte.....	98
Figura 2.27	Costes totales de transporte y de inventario en tránsito.....	99
Figura 3.1	Tipos de modelos de inventario.....	114
Figura 3.2	Ciclo del inventario conjunto cliente-proveedor	118
Figura 3.3	Funciones de coste.....	119
Figura 3.4	Cadena de suministro proveedor-transportista-cliente	147
Figura 3.5	Costes de abasto y entrega.....	165
Figura 4.1	Producción de automóviles y ventas en los Estados Unidos	195
Figura 4.2	Cambio de paradigma.....	203
Figura 4.3	Complejidad de la cadena de suministro del sector automoción.....	207
Figura 4.4	Cadena de suministro del sector de la automoción.....	211
Figura 4.5	Posición de la compañía de segundo nivel en la cadena de suministro	215
Figura 4.6	Involucramiento del proveedor en el proceso de ensamble.....	234
Figura 4.7	La combinación del suministro <i>justo a tiempo</i> y el programado	236
Figura 4.8	PIB del sector de la automoción, 2004.....	241
Figura 4.9	Empleo directo en el sector automotriz	241
Figura 4.10	Principales ensambladoras de vehículos en México.....	243
Figura 4.11	Volumen de la producción de automóviles por empresa y marca	243
Figura 4.12	Variación porcentual de la producción de automóviles por mercado	244
Figura 4.13	Índice del volumen físico del valor agregado bruto del sector de la automoción según rama de actividad	245
Figura 4.14	Distribución geográfica de las empresas de autopartes	246
Figura 4.15	PIB del sector de las autopartes.....	247
Figura 4.16	Participación anual del PIB de las autopartes respecto al PIB manufacturero.....	248
Figura 4.17	Exportación anual de vehículos y autopartes	249
Figura 4.18	Destino de las exportaciones de autopartes	251
Figura 4.19	Pirámide del sector de la automoción mexicana	255
Figura 5.1	Marco metodológico para el desarrollo de la propuesta.....	271
Figura 5.2	Red del problema del tamaño de lote	302
Figura 5.3	Términos generales en el contexto ExW	310

Figura 5.4	<i>Incoterm</i> DDP (<i>Delivery Duty Paid</i>).....	311
Figura 5.5	<i>Incoterms</i> que pueden ser modelados.....	312
Figura 5.6	Ejemplo del cambio en el precio de un producto según el tipo de <i>Incoterm</i>	312
Figura 5.7	Función del trabajo de transporte	315
Figura 5.8	Esquema de interrelación de los criterios coste y nivel de servicio del transporte y su impacto en los costes del cliente	318
Figura 5.9	Modelo semántico: estructura básica de la cadena de suministro modelada para un período t dado	321
Figura 5.10	Tiempo de ciclo y decisiones de ordenar.....	324
Figura 5.11	Pedidos lanzados en t - m períodos antes	324
Figura 6.1	Representación del espacio de las decisiones y de los objetivos	347
Figura 6.2	Una población de cinco soluciones	350
Figura 6.3	Definición del conjunto no dominado N	352
Figura 6.4	Frontera Pareto	353
Figura 6.5	Resultado de objetivos sin conflicto.....	355
Figura 6.6	Espacio de los objetivos: punto ideal para el caso de maximización.....	356
Figura 6.7	Espacio de los objetivos: vector utópico para el caso de maximización.....	357
Figura 6.8	Matriz de pagos	358
Figura 6.9	Proyección del punto de nivel de aspiración factible o infactible	363
Figura 6.10	Método de los pesos con problemas convexos y no convexos	372
Figura 6.11	Diferentes cotas superiores en el método de las restricciones.....	375
Figura 6.12	Diferentes métricas	377
Figura 6.13	Diagrama de flujo del método STEP	379
Figura 6.14	Diagrama de flujo del método GDF	382
Figura 6.15	Método interactivo Z-W	384
Figura 6.16	Problema lexicográfico de los pesos Tchebycheff	389
Figura 6.17	Diagrama de flujo del algoritmo NIMBUS	395
Figura 6.18	Perfil del algoritmo general	397
Figura 6.19	Árbol de decisión para seleccionar la técnica de solución de problemas multiobjetivo.....	400

Figura 6.20	Metodología para la solución del modelo.....	402
Figura 7.1	Flujos típicos del suministro internacional de autopartes en el sector del automóvil de la empresa bajo estudio	414
Figura 7.2	Variabilidad de la desmanda	424
Figura 7.3	Estructura de costes del cliente (no coordinado) con énfasis en el coste (Escenario 0).....	433
Figura 7.4	Soluciones no dominadas del cliente sin coordinación	435
Figura 7.5	Frontera eficiente del cliente (Escenario 1) (No coordinado con énfasis en el coste).....	436
Figura 7.6	Frontera eficiente del proveedor (Escenario 1) (No coordinado con énfasis en el coste).....	436
Figura 7.7	Frontera eficiente del sistema (Escenario 1) (No coordinado con énfasis en el coste).....	437
Figura 7.8	Frontera eficiente del cliente (Escenario 2) (No coordinado considerando ambos criterios).....	438
Figura 7.9	Frontera eficiente del proveedor (Escenario 2) (No coordinado considerando ambos criterios).....	439
Figura 7.10	Frontera eficiente del sistema (Escenario 2) (No coordinado considerando ambos criterios).....	440
Figura 7.11	Frontera eficiente del cliente (Escenario 3) (No coordinado con énfasis en el nivel de servicio de transporte)	440
Figura 7.12	Frontera eficiente del proveedor (Escenario 3) (No coordinado con énfasis en el nivel de servicio de transporte)	441
Figura 7.13	Frontera eficiente del sistema (Escenario 3) (No coordinado con énfasis en el nivel de servicio de transporte)	442
Figura 7.14	Frontera eficiente del cliente (Escenario 4) (No coordinado con énfasis en el coste).....	443
Figura 7.15	Frontera eficiente del proveedor (Escenario 4) (No coordinado con énfasis en coste).....	443
Figura 7.16	Frontera eficiente del sistema (Escenario 4) (No coordinado con énfasis en coste).....	444
Figura 7.17	Frontera eficiente del cliente (Escenario 5) (No coordinado considerando ambos criterios).....	445
Figura 7.18	Frontera eficiente del proveedor (Escenario 5) (No coordinado considerando ambos criterios).....	445
Figura 7.19	Frontera eficiente del sistema (Escenario 5) (No coordinado considerando ambos criterios).....	446

Figura 7.20	Frontera eficiente del cliente (Escenario 6) (No coordinado con énfasis en el nivel de servicio de transporte)	447
Figura 7.21	Frontera eficiente del proveedor (Escenario 6) (No coordinado con énfasis en el nivel de servicio de transporte)	448
Figura 7.22	Frontera eficiente del sistema (Escenario 6) (No coordinado con énfasis en el nivel de servicio de transporte)	448
Figura 7.23	Tasa de descuento en el precio de los productos (<i>Incoterm ExW</i>)	450
Figura 7.24	Pérdidas del cliente en el contexto del <i>Incoterm ExW</i> (Escenario 1)	453
Figura 7.25	Soluciones no dominadas del proveedor coordinado en el contexto del <i>Incoterm ExW</i>	454
Figura 7.26	Ahorros o pérdidas del proveedor en el contexto del <i>Incoterm ExW</i> (Escenario 1)	454
Figura 7.27	Coste total del sistema en el contexto del <i>Incoterm ExW</i> (Escenario 1)	455
Figura 7.28	Ahorros o pérdidas del sistema en el contexto del <i>Incoterm ExW</i> (Escenario 1)	456
Figura 7.29	Nivel de servicio del transporte en el contexto del <i>Incoterm ExW</i> (Escenario 1)	457
Figura 7.30	Índice de nivel de servicio del transporte con relación al coste (Escenario 1).....	457
Figura 7.31	Estructura de costes del cliente coordinado (Escenario 1)	458
Figura 7.32	Estructura de costes del proveedor coordinado (Escenario 1).....	458
Figura 7.33	Pérdidas del cliente en el contexto del <i>Incoterm ExW</i> (Escenario 2).....	459
Figura 7.34	Ahorros o pérdidas del proveedor en el contexto del <i>Incoterm ExW</i> (Escenario 2)	463
Figura 7.35	Coste total del sistema en el contexto del <i>Incoterm ExW</i> (Escenario 2)	466
Figura 7.36	Ahorros o pérdidas del sistema en el contexto del <i>Incoterm ExW</i> (Escenario 2)	464
Figura 7.37	Nivel de servicio del transporte en el contexto del <i>Incoterm ExW</i> (Escenario 2)	466
Figura 7.38	Índice de nivel de servicio del transporte con relación al coste	466
Figura 7.39	Estructura de costes del cliente (sin coordinación)	467
Figura 7.40	Coste total del sistema en el contexto del <i>Incoterm ExW</i> (Escenario 3)	468

Figura 7.41	Ahorros del sistema en el contexto del <i>Incoterm ExW</i> (Escenario 3)	469
Figura 7.42	Nivel de servicio del transporte bajo el <i>Incoterm ExW</i>	469
Figura 7.43	Índice de nivel de servicio del transporte con relación al coste	470
Figura 7.44	Ahorro del cliente en el contexto del <i>Incoterm ExW</i> (Escenario 3)	470
Figura 7.45	Ahorros y pérdidas del proveedor en el contexto del <i>Incoterm ExW</i> (Escenario 3)	472
Figura 7.46	Estructura de costes del proveedor coordinado en el contexto del <i>Incoterm ExW</i>	474
Figura 7.47	Tasa de descuento en el precio de los productos (<i>Incoterm DDP</i>)	476
Figura 7.48	Comportamiento de la tasa de descuento en la tarifa de transporte	477
Figura 7.49	Ahorros del cliente	478
Figura 7.50	Ahorros y pérdidas del proveedor	479
Figura 7.51	Soluciones no dominadas del proveedor coordinado bajo el <i>Incoterm DDP</i> (Incluye costes de transporte y descuento en las tarifas)	481
Figura 7.52	Soluciones no dominadas del proveedor coordinado bajo el <i>Incoterm DDP</i> (No incluye costes de transporte y descuento en la tarifas)	481
Figura 7.53	Índice de nivel de servicio del transporte con relación al coste	483
Figura 7.54	Nivel de servicio del transporte bajo el <i>Incoterm DDP</i> (Comparación No coordinado variable vs coordinado variable)	483
Figura 7.55	Ahorros del sistema	484
Figura 7.56	Coste total del sistema (miles)	485
Figura 7.57	Índice de nivel de servicio del transporte	486
Figura 7.58	Ahorros del sistema	490
Figura 7.59	Nivel de servicio del transporte	493
Figura 7.60	Índice de nivel de servicio del transporte	493
Figura 7.61	Costes de transporte por tipo de término de negociación	494
Figura 7.62	Reparto modal de la carga para un proceso no coordinado	495
Figura 7.63	Asignación de la carga al modo más rápido otorgando mayor énfasis al nivel de servicio	496
Figura 7.64	Reparto modal de la carga para un proceso coordinado ExW	496
Figura 7.65	Tamaño de la orden por tipo de negociación	497
Figura 7.66	Reparto modal de la carga para un proceso coordinado DDP	497

Figura 7.67	Frontera Pareto que contiene las soluciones no dominadas	499
Figura 7.68	Soluciones no dominadas en el contexto ExW generadas con el método de Vassilev y Narula	500
Figura 7.69	Soluciones no dominadas en el contexto DDP generadas con el método de Vassilev y Narula	501

Resumen

La administración eficiente de la cadena de suministro requiere la integración de diversas actividades logísticas. En particular, beneficios importantes incluyendo reducción de costes y mejoras en el nivel de servicio se pueden lograr coordinando las actividades de transporte y de administración de los inventarios. En esa dirección, se formularon tres modelos de optimización bicriterio (coste y nivel de servicio) que consideran simultáneamente la selección del modo de transporte y define la política de inventario cuando la demanda es determinista y variable en el tiempo. Un modelo está propuesto en el contexto no coordinado y dos están basados en la estrategia de coordinación Épocas Comunes de Resurtido; los modelos asumen un solo proveedor que abastece n diferentes productos, utilizando tres modos de transporte (rápido, medio y lento) a un solo cliente. Se construyen las fronteras de eficiencia para los dos modelos coordinados basado en los términos del comercio internacional (*Incoterms*) *ExWork* (ExW) y *Duty Delivery Paid* (DDP). Para ilustrar la aplicabilidad del modelo, se considera un caso de estudio específico en el sector de la automoción.

Resum

L'administració eficient de la cadena de subministrament requereix la integració de diverses activitats logístiques. En particular, beneficis importants incloent reducció de costos i millores en el nivell de servei es poden aconseguir coordinant les activitats de transport i d'administració dels inventaris. En eixa direcció, la present tesi construeix tres models d'optimització bicriterio (cost i nivell de servei) que consideren simultàniament la selecció del mode de transport i defineix la política d'inventari quan la demanda és determinista i variable en el temps. Un model està construït en el context no coordinat i dos estan basats en l'estratègia de coordinació Èpoques Comunes de Reassortit; els models assumeixen un únic proveïdor que abasteix n diferents productes, utilitzant tres modes de transport (ràpid, mitjana i lent) i un únic client. Es construeixen les fronteres d'eficiència per als dos models coordinats basat en els termes del comerç internacional (*Incoterms*) *ExWork* (ExW) i *Duty Delivery Paid* (DDP). Per a il·lustrar l'aplicabilitat del model, es considera un cas d'estudi específic en el sector de l'automoció.

Abstract

Efficient supply chain management requires integration of several logistical activities. In particular, relevant benefits as costs reduction and service level improvement can be obtained by coordinating inventory control and transportation systems. In this sense, this thesis is oriented to develop three bi-criteria optimization models (cost and efficiency) that simultaneously consider the selection of transportation mode and definition of inventory policy under deterministic and dynamic demand. One model is structure in the context non coordinate and two models are based on the coordination strategy “Common Replenishment Epochs”; all models assumes a single supplier of n different products, three modes of transport (fast, average and slow) and unique client with deterministic and variable demand. The efficient frontier is constructed for two models coordinated based on Incoterms ExWork (ExW) and Duty Delivery Paid (DDP). To illustrate the applicability of the model, a specific case study is considered in the automotive sector.

Capítulo 1

Introducción

1.1 Presentación

El estudio de la gestión de inventarios es un campo del conocimiento que ha sido examinado de manera científica desde hace varias décadas. Desde que Harris (1915) propuso el modelo de lote económico, muchos investigadores se han dado a la tarea por resolver múltiples problemas de inventarios. Inicialmente, el enfoque se orientó hacia la definición del tamaño del lote y el período de abastamiento para lograr el coste mínimo. Sin embargo, con la ayuda de modelos más avanzados y estrategias innovadoras de gestión, investigadores y practicantes resuelven casos cada vez más complejos con un enfoque integral (Silver, *et al*, 1998). El papel que juegan dichos modelos, radica en la posibilidad de atender problemas de inventarios en contextos más amplios de análisis, como es el caso de las cadenas de suministro internacionales, constituidas por empresas localizadas en diferentes partes del mundo. El uso y aplicación de ese tipo de modelos, ha permitido una mayor visibilidad de la cadena de suministro, apoyando a la toma de decisiones coordinadas sobre el abastecimiento y control de los inventarios.

En los últimos años ha crecido el interés en la administración eficiente de la cadena de suministro, y la coordinación de los diversos actores ha sido reconocida como una de las actividades principales. La coordinación se ha estudiado desde muy distintos puntos de vista. Según Thomas y Griffin (1996), la coordinación en la cadena de suministro puede llevarse a cabo a los niveles de decisión estratégico y táctico. En el ámbito estratégico se incluye la decisión de abrir o cerrar plantas o centros de distribución, asignar equipo a instalaciones de producción, selección de la actividad a ser cedida a terceros (*outsourcing*), asignar la fabricación de un producto a una planta, diseñar conjuntamente un determinado producto, entre otras. A nivel operacional se citan la coordinación proveedor - cliente, la coordinación producción - distribución, la coordinación inventarios - distribución (multieslabones, multietapas, diferentes topologías, problemas de ruteo e inventario).

En particular, la coordinación proveedor - cliente se puede realizar: *a*) basada en la reducción de costes sin cambiar las políticas de abastecimiento; *b*) introduciendo el

sistema EDI (*Electronic Data Interchange*); *c*) introduciendo nuevos equipos de manejo de materiales; *d*) definiendo políticas de inventarios conjuntas; *e*) proporcionando descuento en los precios bajo los supuestos del lote económico; *f*) administrando los costes de resurtido y preparación; *g*) considerando Épocas Comunes de Resurtido; *h*) basada en la formación de familias de productos que comparten un tiempo de preparación; *i*) definiendo relaciones de colaboración a largo plazo (contratos, precios, apoyo a la innovación); y *j*) una combinación de las anteriores.

Entre los aspectos que apoya la coordinación proveedor - cliente en la cadena de suministro se encuentran la reducción en los tiempos de entrega, mayor confiabilidad de los envíos, una reducción de costes (de transporte, de producción, de ordenar), mejora en la programación de la producción y de los envíos, mayor rentabilidad de la cadena, etc., con la consiguiente mejora en la posición de las empresas en la cadena.

En la actualidad, dada la dispersión geográfica de las empresas, es una práctica común que permitan a sus proveedores que los productos que fabrican le sean enviados haciendo uso de distintos modos de transporte para apoyar los diversos tiempos de respuesta que proporciona cada modo. Por ejemplo, HP ensambla cajas MOD0 en su planta de Singapore, pero permite a sus centros de distribución localizados en Grenoble, Guadalajara, Roseville y Singapore elegir entre envíos por barco o avión (Beyer y Ward, 2000). Otros ejemplos de este tipo son frecuentes en las empresas maquiladoras instaladas en México, donde por razones de costes y tiempos de entrega, es adecuado el uso de diferentes modos de transporte para el abasto de sus proveedores localizados en EUA. La misma práctica la están aplicando diferentes empresas en México, aunque sin un análisis técnico y solo basada en la urgencia del envío. Esta situación, ha llevado a plantear una serie de inconvenientes que merecen mayor atención.

La determinación de políticas de inventarios coordinadas que consideren explícitamente la selección del modo de transporte y su influencia, ha sido poco estudiada en la literatura. Para el caso del sector industrial mexicano, en particular el sector de la automoción, que vende sus productos principalmente en Norteamérica y Europa, incurre en tiempos de viaje significativos que necesitan contar con mecanismos eficientes que permitan sincronizar políticas conjuntas de inventarios y transporte, en virtud de que los costes por almacenamiento de mercancías pueden representar cantidades importantes.

Simatupang y Sridharan (2002) reconocen que la sincronización de decisiones contribuye a una mejora en el desempeño global de la cadena y demanda que los participantes compartan información, autoricen la participación de otros miembros en su toma de decisiones y alineen sus incentivos con las medidas de desempeño comunes, ya que es frecuente que haya conflictos entre las medidas individuales de los participantes. Una propuesta general de solución a dicha problemática, ha sido la adopción de la estrategia Épocas Comunes de Resurtido (ECR) para la coordinación de inventarios, propuesta por Viswanathan y Piplani (2001).

Dentro de las decisiones sincronizadas que permiten dicha estrategia, está la integración de procesos en la cadena, que implica métricas de evaluación conjunta entre el abasto, el transporte y el servicio al cliente. En este sentido, surge la idea de considerar la posibilidad de combinar este tipo de estrategia con el uso de diferentes modos de transporte para planificar el abasto y el control de los inventarios.

Adicionalmente, la exportación/importación de productos requiere que el proveedor y comprador acuerden el *Incoterm* más conveniente, esta decisión influye en las políticas de inventarios ya que los costes y tiempos de traslado se ven influenciados por quienes realicen el transporte y la importación/exportación. Un *Incoterm* (*International commerce terms*) es un conjunto de acuerdos internacionales auspiciados por la *International Chamber of Commerce* (ICC) donde se dividen las responsabilidades y los costes el cliente y el proveedor; además, reflejan el estado del arte de las prácticas del transporte internacional.

1.2 Preguntas de investigación

Hasta donde se sabe, el problema de coordinación del abastecimiento basado en Épocas Comunes de Resurtido no ha sido estudiado para el caso de demanda dinámica, excepto por Gaytán y Pliego (2002) y Reyes y Gaytán (2003). El problema que se estudia tiene un parecido al problema *Joint Replenishment Problem* (JRP) donde los clientes realizan pedidos al proveedor en fechas específicas; sin embargo, no consideran los beneficios que proporciona al proveedor el saber cuándo serán realizados los pedidos de los clientes.

En cuanto a la coordinación basada en el uso de diversos modos de transporte, recientemente han sido publicados trabajos donde se diseñan políticas de inventarios considerando diversos modos de transporte y diversas estrategias de actualización de la demanda. Sethi y Sorger (1991), Gurnani y Tang (1999) y Gallego y Özer (2001) actualizan los pronósticos y analizan diferentes políticas óptimas. Los modelos de inventarios de Moinzadeh y Nahmias (1988) y Whittemore y Saunders (1977) tienen en cuenta costes por ordenar fijos y variables con dos modos de abasto (instantáneo y de un período).

Entre los autores que estudian modelos que consideran más de tres modos de transporte se encuentran Fakuda (1964), Zhang (1996) y Sethi, *et al.* (2005). Fakuda hace la suposición de que las ordenes ocurren un período sí y otro no. Bajo dicho supuesto, transforma el problema a uno de dos modos. Zhang (1996) retoma el trabajo de Fakuda y considera tres modos de entrega para determinar los niveles de inventario a través de un algoritmo heurístico. Sethi, *et al.* (2005) asume tres modos de transporte (rápido, mediano y lento) con una actualización de los pronósticos, demostrando la existencia de políticas óptimas para cada modo.

Las ideas anteriores presentan tres dificultades principales: a) no han sido probadas en situaciones que ocurren en la práctica, b) no integran la coordinación del abasto más allá del uso de modos de transporte sin tener en cuenta las ordenes en conjunto y c) dejan fuera la práctica común usada en la industria donde se planean el abasto para un horizonte de planeación finito predefinido. Por lo tanto, es conveniente estudiar esas problemáticas, sobre todo con una óptica de las empresas localizadas en México.

Con especial énfasis en el estudio de la coordinación de los inventarios entre un cliente y un proveedor, considerando el suministro de productos a través de diversos modos de transporte en el contexto de los términos del comercio internacional ExW (*ExWork*) y DDP (*Duty Delivery Paid*), utilizando la estrategia de gestión Épocas Comunes de Resurtido (ECR), y teniendo en cuenta una demanda dinámica con políticas de descuento en el precio de los productos y en las tarifas de transporte, en esta tesis doctoral se propone analizar los siguientes aspectos:

- ¿Bajo que condiciones del coste total de la gestión de inventarios y nivel de servicio de transporte deben los clientes y proveedores tomar la decisión de aceptar la estrategia de coordinación ECR?
- ¿Cómo de efectiva puede resultar la práctica de la coordinación de inventarios utilizando la estrategia ECR en una cadena de suministro para ayudar al proveedor a negociar sobre la base de los términos del comercio internacional ExW y DDP?
- ¿Es posible reducir los costes en el sistema cliente-proveedor al permitir el abasto de productos haciendo uso de diversos modos de transporte bajo la estrategia ECR?
- Al hacer uso de diversos modos y de la estrategia ECR, ¿Es posible lograr beneficios en coste en el sistema cliente-proveedor considerando descuentos en el precio de los productos y en las tarifas de transporte que considere los volúmenes transportados?

1.3 Objetivo general

Con la finalidad de responder a los cuestionamientos antes citados, la presente tesis doctoral tiene como objetivo general construir los modelos de optimización que describan el fenómeno de la coordinación del abastecimiento utilizando la estrategia ECR para la gestión de inventarios considerando tres modos de transporte, aplicando mecanismos de descuentos en los productos y en las tarifas debido al volumen transportado, en el escenario del comercio internacional y bajo los términos de negociación (*Incoterms*) ExW y DDP.

El objetivo general, se refuerza a partir de que en un estudio previo (Jiménez y Hernández, 2002) se ha podido constatar que la mayor parte de la literatura que examina el tema de la gestión de la cadena de suministro, no incluyen al transporte como una variable de decisión, sino que éste es considerado como una entidad implícita en el proceso de abasto. En general, el transporte es juzgado por muchos, como un elemento de soporte y como una actividad funcional. Sin embargo, en la práctica es uno de los factores que más llama la atención por dos cuestiones principales: *i*) representa un coste relevante en el gasto de las empresas, y *ii*) su bajo nivel de servicio, producto de su mala planeación, muchas veces afecta al nivel de servicio al cliente y al sistema de

inventarios/producción. Por estos motivos, independientemente de que el transporte de productos entre proveedores y clientes tenga un carácter exógeno a sus sistemas de gestión, puede plantearse que es un factor que tiene una fuerte influencia en la toma de decisiones estratégicas de la cadena de suministro. Para ser más precisos, la Tesis que fundamenta este trabajo de investigación considera que el transporte puede ser valorado como una actividad estratégica que afecta el desempeño de la cadena de suministro, y en especial al sistema de inventarios de las empresas.

1.4 Justificación

El estudio de nuevas prácticas para la administración de la cadena de suministro es una actividad muy intensa por parte de académicos y practicantes. Dados los nuevos retos que significan integrar a los diversos actores para lograr mejor servicio al cliente y mayor competitividad, se han propuesto diversas estrategias para realizar algún tipo de coordinación entre ellos. Una manera de realizar la coordinación en la cadena de suministro es apoyar las políticas de inventarios. En México la mayoría de las empresas creen que adquiriendo algún tipo de programa de cómputo tipo ERP puede ser la respuesta a la problemática de inventarios (y otras de tipo administrativo). Sin embargo, en el contexto de los inventarios, tales sistemas no permiten resolver situaciones particulares, y por ser cerrados, no es posible mejorar los algoritmos que apoyen la toma de decisiones, además de ser muy caros.

La experiencia indica que hacer uso de sistemas de cómputo como el mencionado, pueden producir soluciones apenas razonables pero muchas de ellas pueden ser mejoradas. Por otra parte, se ha demostrado que la estrategia de coordinación ECR es competitiva en costes para los miembros de la cadena. Al extender esos resultados a la coordinación basada en múltiples modos de transporte se espera proporcionar soluciones a la problemática que enfrentan muchas empresas mexicanas que importan/exportan sus productos desde el extranjero, en especial de Europa y de Norte América.

1.5 Alcance

En términos generales, el alcance de la presente tesis se enfoca al proceso integrado del suministro y a la gestión de inventarios. El ámbito y aplicación de los

modelos desarrollados se encuentran sobre la base de una empresa mexicana del sector de las autopartes, cuyas condiciones han permitido generar la idea principal de estudio. Para lograr el objetivo general, el modelado de la coordinación de los inventarios se ha limitado a representar la cadena de abastecimiento en su estructura básica, conformada por un proveedor que abastece diferentes productos a un cliente, utilizando diversos modos o cadenas de transporte en un horizonte de planeación finito. Los modelos diseñados para representar este esquema de gestión se desarrollan en el ámbito determinista bajo un enfoque multicriterio/multiobjetivo, en el contexto del comercio internacional. A partir de este ámbito de estudio, la estructura de los modelos se concreta a simular el abasto coordinado de productos en los términos del comercio internacional ExW y DDP, seleccionados a partir de que ambos *Incoterms* representan el caso extremo de las diversas negociaciones comerciales en términos del lugar de entrega de las mercancías y responsabilidades de transporte por los agentes logísticos. Se prevé que pueden ser implementadas variaciones en el modelado para conocer el comportamiento del fenómeno bajo estudio para el caso de los *Incoterms* “intermedios”.

1.6 Contexto general de los modelos propuestos

En este trabajo de investigación se desarrollan tres modelos matemáticos de optimización multicriterio: uno que simula la operación no coordinada del sistema de suministro e inventarios de un cliente y un proveedor, y dos para el caso cuando se utiliza la estrategia de coordinación ECR, uno en el contexto de negociación ExW y otro en el ambiente DDP. Dichos modelos multicriterios buscan minimizar el coste de la gestión coordinada de los inventarios, y maximizar el nivel de servicio del transporte utilizando la estrategia ECR, considerando una demanda determinista y variable en el tiempo. El planteamiento de los modelos coordinados, parten de la idea de que en la estrategia ECR, el proveedor tiene pleno conocimiento de las operaciones de su cliente, por tanto, reduce al mínimo sus costes de inventarios haciéndolos casi imperceptibles, operando con un tratamiento similar a la “fabricación por pedido”. En ese sentido, se asume que existe un alto grado de cooperación y colaboración entre las partes.

Por lo anterior, la coordinación se logra sólo a través del descuento que el proveedor ofrece al cliente, quién evalúa sus beneficios a partir de verificar que el ahorro propiciado por dicho descuento sea superior al coste que le puede provocar el sobre inventario por aceptar la estrategia ECR; ambos modelos coordinados, bajo la

base de los *Incoterms* ExW y DDP, permiten descuentos sobre el precio de los productos, sin embargo, el modelo con base en el *Incoterm* DDP, también considera descuentos en la tarifa de transporte. En términos generales, el modelo no coordinado trabaja para cualquier término de negociación del comercio internacional (*Incoterms*).

1.7 Metodología

De acuerdo con la técnica de la instrucción heurística que sustenta el modelo para la investigación científica de la gestión, que permite la toma de decisiones, predicción, explicación y (o) comprensión de los fenómenos de la gestión de procesos (González, 2002), se ha desarrollado el marco metodológico de estudio, arropado por la estructura de investigación que propone Pérez (1994), la cual se compone por los elementos de entrada, identificados como los valores de la gestión de procesos y la realidad dada por el entorno, que permiten el establecimiento de los paradigmas (estado del arte) para la elaboración de los métodos (propuesta) y su posterior aplicación práctica (aplicación). En este contexto, para dar respuesta a las preguntas de investigación, el desarrollo metodológico comienza con el reconocimiento del fenómeno en su esencia y sus causas, expuesto a través del planteamiento del problema y de la tesis de estudio, reforzado por la revisión bibliográfica que da lugar al marco teórico y al estado del arte del tema de investigación.

A partir de los planteamientos identificados en el marco teórico conceptual (capítulo 2), así como el Estado del Arte (capítulo 3), se determinan las bases científico-metodológicas para desarrollar los modelos que buscan dar solución al planteamiento del problema, pensado en el contexto del sector de la automoción (capítulo 4), destacando la selección de ciertos modelos que sirven de referencia y los fundamentos teóricos susceptibles de ser aprovechados para resolver el problema planteado.

En virtud del desarrollo de los modelos, su validación práctica es necesaria, por lo que se propone identificar aquellas técnicas de solución (capítulo 6) que permiten la aplicación de los modelos y obtención de los resultados (capítulo 7), a partir de los cuales la deducción de las conclusiones permitirá examinar el desempeño de los modelos mismos, analizar con mayor profundidad la problemática, corroborar las preguntas de investigación, revisar las implicaciones para la teoría, las prácticas y las

políticas de gestión, así como identificar las limitaciones y líneas futuras de investigación (capítulo 8). La figura 1.1 muestra el desarrollo metodológico antes descrito.

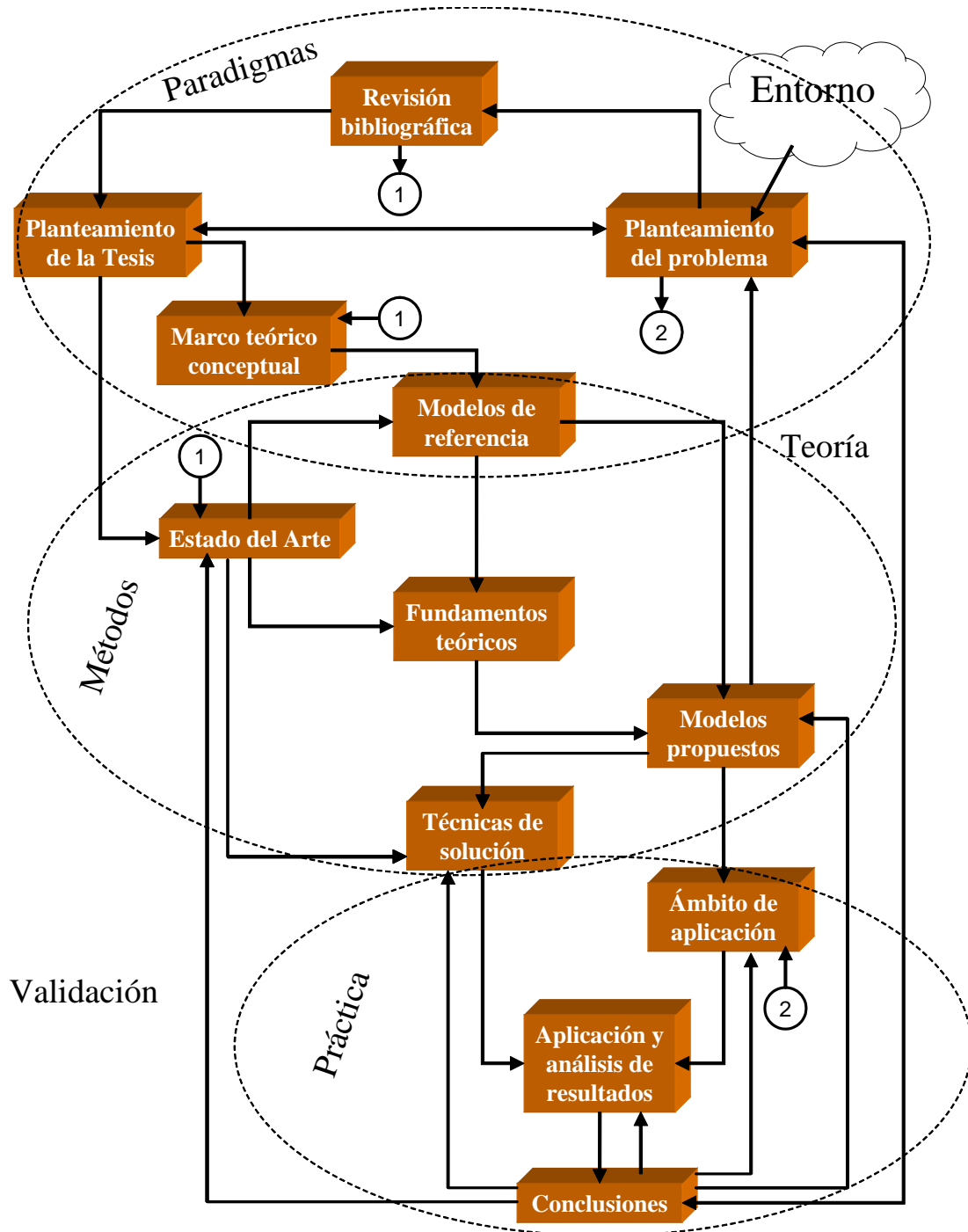


Figura 1.1
Marco metodológico para el desarrollo de la propuesta de investigación

1.8 Esquema general de la tesis

En términos generales, la estructura de la tesis se encuentra organizada por los siguientes capítulos que la constituyen:

El capítulo 1 de **“Introducción”**, contiene algunos aspectos generales que puntualizan el campo de conocimiento del tema de estudio, se incluye el objetivo general, la justificación, los alcances, así como una presentación de la metodología empleada y el contexto general de los modelos propuestos; en este apartado, se hace una breve descripción del contenido de cada uno de los capítulos.

El capítulo 2, **“Marco teórico conceptual de la coordinación en la cadena de suministro”**, presenta las características más relevantes sobre la coordinación de la cadena de suministro. El capítulo inicia con un esbozo general de la gestión de la cadena de suministro; después, especifica el concepto de coordinación desde el punto de vista de la gestión logística. Brevemente se abordan los temas de las relaciones de colaboración e integración empresarial como elementos facilitadores de la coordinación de la cadena de suministro. Posteriormente, se presenta un análisis del medio ambiente operativo que describe el ambiente de competitividad internacional, con el cual, se establecen las bases del comercio mundial que dan origen a la formación de las cadenas de suministro y sus necesidades de coordinación. Se presentan los principales problemas, obstáculos y mecanismos de la coordinación. Al final, se enfatiza la relevancia de la coordinación entre clientes y proveedores en los modelos de empresa, centralizados y descentralizados, identificándose sus diferencias específicas.

En el capítulo 3, **“Modelos matemáticos para la coordinación de inventarios: Estado de Arte”**, se presenta el planteamiento general del problema de la coordinación de inventarios desde el punto de vista del cliente y del proveedor (política individual), así como del sistema (política conjunta). Describe el estado del arte de los modelos más relevantes relacionados con la coordinación de inventarios, clasificados sobre la base de las estructuras básicas de la cadena de suministro. Dicha revisión se complementa con un análisis de los modelos de coordinación del sistema de inventarios que involucran, de manera explícita, las variables fundamentales del transporte; clasificados también bajo el mismo criterio. Por último, se presentan las conclusiones finales del mismo.

En el capítulo 4, **“El sector de la automoción y su gestión en el suministro de las autopartes”**, se analizan las tendencias mundiales del sector de la automoción, su dinámica, los factores de la demanda y las estrategias de gestión empleadas por los fabricantes de automóviles; más adelante, presenta la estructura y funciones de los miembros de la cadena de suministro, se destacan los modelos de aprovisionamiento empleados por los proveedores; en seguida, se sintetizan las características macroeconómicas de la industria ensambladora de coches y del sector de las autopartes en México; al final, se hace una breve descripción de la operatividad del sector automoción de este país y sus conclusiones.

El Capítulo 5 de **“Modelos propuestos para la coordinación de inventarios utilizando diversos modos de transporte para el abastecimiento”**, describe en detalle los modelos de referencia que dan lugar a las ideas materializadas en este capítulo; a partir de dichos modelos, se identifican y explican los fundamentos teóricos que se toman de base para la formulación de la propuesta, la cual incluye el planteamiento y definición del problema, así como el desarrollo puntual de los modelos para la coordinación de inventarios; al final, se presentan algunos comentarios concluyentes sobre la estructura y formulación de los modelos propuestos.

Por lo que respecta al capítulo 6, **“Elección del método de solución de problemas multiobjetivo y diseño del esquema de modelado”**, primeramente presenta una serie de conceptos que ayudan a comprender los términos empleados en la optimización multiobjetivo. Después, se exponen brevemente los métodos más difundidos que dan solución a este tipo de problemas. Más tarde, con la ayuda del proceso de selección de Sen y Yang (1998) y el de Miettinen (1999), se hace una descripción del procedimiento de selección de los métodos empleados para resolver el problema en estudio. Seguidamente, se presenta el diseño metodológico para llevar a cabo el proceso de modelado y generar las alternativas de solución que son analizadas en el siguiente capítulo. Al término, se presentan las conclusiones derivadas del estudio y elección del método multiobjetivo.

Con relación al capítulo 7, **“Aplicación de los modelos propuestos a una empresa del sector de las autopartes: Análisis numérico”**, en primer lugar se establece el marco empírico que describe de manera general las características de la empresa que se tomó de referencia, y de la cual se obtuvieron los parámetros requeridos

por los modelos. Inmediatamente después, presenta una descripción del proceso de experimentación, diseñado para hacer la evaluación de las alternativas de solución encontradas con los modelos, para cada uno de los diferentes tipos de negociación del comercio internacional (ExW y DDP). Posteriormente, se muestran los resultados obtenidos con el método de Vassilev y Narula (1993), para cuando ninguna alternativa generada con el método de los pesos es satisfactoria para el tomador de decisiones. Al final se presentan las conclusiones derivadas de este análisis.

Por último, el capítulo 8 de las **“Conclusiones y líneas de futuro de investigación”**, recoge las conclusiones generales obtenidas de la investigación, de la aplicación de los modelos y de los resultados alcanzados. Se describen las conclusiones sobre la problemática analizada, sobre las preguntas de investigación, implicaciones para la teoría, las prácticas y políticas de gestión; asimismo, se identifican las limitaciones y líneas futuras de investigación.

Al término de cada capítulo se presentan las referencias consultadas, organizadas por orden alfabético.

Referencias

1. (Beyer y Ward, 2000) Beyer, D., y Ward, J. (2000) “Network Server Supply Chain HP: a Case Study”. HP Laboratories Technical Report, HPL-2000-84.
2. (Fakuda, 1964) Fakuda, Y. (1964). "Optimal Policies for the Inventory Problem with Negotiable Leadtime". *Management Science*; vol. 10, pp. 690-708.
3. (Gallego y Özer, 2001) Gallego, G. y Özer, Ö. "Integrating Replenishment Decisions with Advanced Demand Integration". *Management Science*; vol. 47, pp. 1344-1360.
4. (Gaytán y Pliego, 2002) Gaytán, J. y Pliego, B. (2002) “Vendor - Multibuyers Coordination through Common Replenishment Epochs under Dynamic Demand”. *INFORMS*, San Jose, California, USA, 17-20.
5. (González, 2002) González G., Roberto (2002). “El Modelo de Plataforma Logística de Petróleo en Cuba”. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría – ISPJAE. Tesis para optar por el grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas. (La Habana).
6. (Gurnani y Tang, 1999) Gurnani, H., y Tang, C. S. (1999). "Optimal Ordering Decisions with Uncertain Cost and Demand Forecast Updating". *Management Science*; vol. 45, pp. 1456-1462.
7. (Jiménez y Hernández, 2002) Jiménez S. J. Elías y Hernández, Salvador (2002). “Marco conceptual de la cadena de suministro: un nuevo enfoque logístico”. Instituto Mexicano del Transporte; Publicación Técnica No. 215. ISSN 0188-7297; Querétaro, México.
8. (Miettinen, 1999) Miettinen, Kaisa (1999) “Nonlinear Multiobjective Optimization “.Kluwer Academic Publishers, Boston.
9. (Moinzadeh y Nahmias, 1998) Moinzadeh, K., Nahmias, S. "A Continuous Review Model for an Inventory System with Two Supply Modes", *Management Science*; vol. 34, pp. 761-773.

10. (Pérez, 1994) Pérez Serrano, Maria Gloria (1994). "Investigación cualitativa e interrogantes: Técnicas y Análisis de Datos". La Muralla, Madrid.
11. (Reyes y Gaytán, 2004) Reyes, J. y Gaytán, J. (2003). "Coordinación del Abastecimiento Proveedor-Clientes bajo la Política ECR Considerando Dos Modos de Transporte". Tesis no publicada de la Maestría en Ciencias con la especialidad de Calidad y Productividad. Toluca, Méx.
12. (Sen y Yang, 1998) Sen, P. y J. B. Yang, 1998. Multiple Criteria Decision Support in Engineering Design. Springer, London, New-York.
13. (Sethi y Sorger, 1991) Sethi, S. y Sorger, G. (1991). "A theory of Rolling Horizon Decision Making". Annals of Operations Research; vol. 29, pp. 387-416.
14. (Sethi, *et al*, 2005) Sethi, Suresh T, Yan, Houmin, Zhang, Hanqin, Gallego, Guillermo y Huang, Ying (2005). "Periodic Review Inventory Model with Three Delivery Modes and Forecast Updates". Journal of Optimization Theory and Applications. vol. 124, num. 1, pp. 137-155.
15. (Silver, *et al*, 1998) Silver, E. A., Pyke, D. F., Peterson, R. (1998). "Inventory Management and Production Planning and Scheduling". Third Edition. John Wiley & Sons, Inc., New York. 754 pp.
16. (Simatupang y Sridhan, 2002) Simatupang, T.M. y Sridhan, R. (2002) "The Collaborative Supply Chain: a Scheme for Information sharing and Incentive Alignment". International Journal of Logistics Management, vol. 13, num. 1, pp. 15-30.
17. (Thomas y Griffin, 1996) Thomas, Douglas J. y Griffin, Paul M. (1996). "Coordinated supply chain management". European Journal of Operational Research; vol. 94, pp. 1-15.
18. (Vassilev y Narula, 1993) Vassilev, Vassil y Narula, Subhash (1993). "A Reference Direction Algorithm for Solving Multiple Objective Integer Linear Programming Problems". The Journal of the Operational Research Society, vol. 44, num. 12, pp. 1201-1209.
19. (Viswanathan y Piplani, 2001) Viswanathan, S. y Piplani, R. (2001). "Coordinating Supply Chain Inventories Through Common Replenishment Epochs". European Journal of Operational Research; vol. 129, pp. 277-286.
20. (Whittemore y Saunders, 1977) Whittemore, A. S, Saunders, S. C. (1977). "Optimal Inventory under Stochastic Demand with Two Supply Options". SIAM J. Appl. Math.; vol. 32, pp. 293-305.
21. (Zhang, 1996) Zhang, V. L. (1996). "Ordering Policies for an Inventory System with Three Supply Modes". Naval Research Logistics; vol. 43, pp. 691-708.

Capítulo 2

Marco teórico conceptual de la coordinación en la cadena de suministro

2.1 Introducción

A partir de la globalización de la economía, las compañías han enfocado sus esfuerzos hacia nichos más específicos y de alto valor añadido. En consecuencia, ahora compran más componentes a los proveedores (Womack, *et al*, 1990). Además, para ser más competitivos, las compañías enfrentan constantemente desafíos para reducir el ciclo de vida del producto, mejorar la calidad, y reducir costes de producción y los plazos de entrega. Sin embargo, Kjenstad (1998) señala que estos desafíos no pueden lograrse con eficacia sólo con hacer cambios en el interior de las unidades organizativas de manera individual, sino que es importante también tener en cuenta todos aquellos aspectos críticos, relaciones e interdependencias que existen con otras compañías.

Harmon (1992), afirma que la compra de materiales y componentes absorbe el 60 ó 70 por cien de los costes de fabricación de algunas compañías. Afirma que los costes de inventario del fabricante y el nivel de servicio al cliente están menos controlados por su propio proceso y que están supeditados a la fiabilidad y tiempo de entrega del proveedor.

Cabe mencionar, que muchos autores (Viswanathan, y Piplani, 2001; Mishra, 2004; Sarmah, *et al*, 2005; Chan y Kingsman 2005) han otorgado gran importancia al tema de la coordinación cliente-proveedor en el contexto de la cadena de suministro bajo diferentes enfoques. En términos generales, reconocen que la coordinación entre los eslabones de la cadena permite potenciar la ventaja competitiva de las compañías, además de vencer los límites organizativos y restricciones para manejar conjuntamente los procesos comerciales.

Los estudios realizados sobre la coordinación en la cadena de suministro, han dado paso a un marco teórico muy amplio de aportaciones, bajo el cual, el contexto de la coordinación se ha difundido bajo diferentes puntos de vista. Por este motivo, el

desarrollo de este capítulo busca esclarecer las bases del por qué la presente tesis se ha orientado hacia la coordinación de los inventarios involucrando al transporte.

Para lograr lo anterior, la estructura de este capítulo está conformada por siete grandes apartados. En el primero se presenta un esbozo general de la gestión de la cadena de suministro, que incluye un análisis de los principales problemas y barreras de gestión, así como un resumen de los diferentes tipos de modelos desarrollados en ese contexto. El segundo, describe el concepto de “coordinación”, y aborda los temas de las relaciones de colaboración e integración empresarial como dos de los principales elementos que la facilitan. En este mismo apartado, se incluye el medio ambiente operativo que describe las condiciones de competitividad internacional, con el cual se establecen las bases del comercio mundial que dan origen a la formación de las cadenas de suministro y sus necesidades de coordinación. En ese ámbito, se identifican los mecanismos y las estrategias más empleadas por los sectores industriales para la coordinación de los inventarios. A partir de esto último, el tercero y cuarto, abordan el problema de los inventarios desde el punto de vista de la coordinación. En el apartado cinco, se presenta el marco teórico de la gestión y operación del transporte, el cual da paso al apartado seis, en el que se lleva a cabo un análisis de los fundamentos teóricos de las relaciones e influencia del transporte en el sistema de inventarios. Finalmente, en el apartado siete se presenta las conclusiones globales de este capítulo.

En términos generales, la estructura de este capítulo busca conocer ¿Cuáles son los paradigmas que rodean la coordinación de los inventarios en el contexto de la cadena de suministro? que ayuden a comprender ¿Cuáles son los argumentos técnicos más relevantes que deben considerarse en el estudio conjunto del sistema de inventarios y del transporte? con la finalidad de entender ¿Cómo interactúan estas dos actividades logísticas?

2.1.1 Gestión de la cadena de suministro

Como resultado de la creciente complejidad del ambiente de los negocios y la necesidad de una mayor eficiencia, la gestión de la cadena de suministro ha ganado interés en los ámbitos académico e industrial (Spens y Bask, 2002). El enfoque abordado está dirigido a prestar atención a las gestiones de negocios fuera de los límites de la compañía. Habitualmente se busca evaluar cómo aprovechar mejor los recursos de

los proveedores para crear valor al cliente (Fawcett y Magnan, 2001). Dicha corriente parece aprovechar claramente las condiciones teóricas de la ventaja competitiva propuesta por Michael Porter (2000). Este autor afirma que “...una empresa baja el coste del comprador [cliente] o aumenta el desempeño de éste...a través del impacto de su cadena de valor en la cadena de valor del comprador”.

La visión empresarial desde este punto de vista, evidencia el enfoque al cliente, y conduce, de acuerdo con Min y Zhou (2002), a cambios en todas las partes de los encadenamientos internos y externos de una empresa, capturando la sinergia de integración inter-funcional e inter-organizacional. Para Hall y Braithwaite (2001) el trabajo de Porter realiza una aportación muy importante en la era moderna, a partir de la definición de la estratégica corporativa y la teoría de la cadena de valor; sostienen que esta posición, sienta parte de las bases de la gestión de la cadena de suministro.

La cadena de valor de una empresa está incrustada en un campo más grande de actividades al que Porter denominó “*Sistema Valor*”. En este contexto, dicho autor señala que los proveedores tienen cadenas de valor (*valor hacia arriba*) que crean y entregan insumos comprados por la empresa. El sistema valor significa que los proveedores no sólo entregan producto, sino también pueden influir en el desempeño de su empresa cliente de muy diversas maneras. El *sistema de valor*, está conformado por la cadena de valor de los proveedores, unidades de negocio, canales de distribución y clientes.

Giménez (2000) reconoce que en la cadena de valor, la empresa que se encuentra en el último eslabón de la cadena de suministro, no es la única que crea valor para el consumidor final, sino la combinación de las actuaciones de cada uno de los miembros que la componen. En consecuencia, debe darse un enfoque holístico a la gestión de la cadena y no tratar de manera individualizada a cada uno de sus componentes. Por ello, Fawcett y Magnan (2001) señalan que los esfuerzos para alinear los objetivos e integrar los recursos a través de los límites de la organización son conocidos como iniciativas de gestión de la cadena de suministro.

Shapiro (2000) menciona que la gestión de la cadena de suministro se refiere a la planificación integrada. Afirma que, en primer lugar, se preocupa por la integración funcional de las actividades de aprovisionamiento, fabricación, transporte (distribución)

y almacenaje. En segundo lugar, a la integración espacial de estas actividades a través de vendedores, instalaciones, y mercados geográficamente dispersos. Y por último, contempla la integración inter-temporal de estas actividades en horizontes de planificación estratégicos, tácticos y operacionales.

De esta manera, Shapiro (2000) concluye que la gestión de la cadena de suministro se lleva a cabo bajo los tres horizontes tradicionales de planeación:

- a) Planificación estratégica.- Implica decisiones de adquisición de recursos para el largo plazo.
- b) Planificación táctica. Implica decisiones de asignación de recursos en horizontes de planificación de mediano plazo.
- c) La planificación operativa:- Implica decisiones que afectan la ejecución a corto plazo del negocio de la compañía.

Mientras que Shapiro (2000) estipula que el objetivo tradicional de la gestión de la cadena de suministro es minimizar el coste total y satisfacer las exigencias de la demanda. Chopra y Meindl (2001) son más específicos y apuntan que el objetivo de la gestión de la cadena de suministro es maximizar el valor total generado; establece que el valor está fuertemente correlacionado con la “rentabilidad” de la cadena de suministro, desde el punto de vista comercial. Determinan que el valor de una cadena de suministro es la diferencia entre el precio del producto final para el consumidor y el esfuerzo invertido para cumplir con los requerimientos de éste último. En el mismo contexto, Shapiro (2000), establece que el coste total puede estar compuesto por los siguientes términos:

- Costes de materia prima y de adquisición
- Costes de inversión en instalaciones
- Costes directos e indirectos de fabricación
- Costes directos e indirectos de los centros de distribución
- Costes de mantenimiento de inventario
- Costes de transporte entre instalaciones
- Costes de transporte para el abasto (*inbound*)
- Costes de transporte de entrega (*outbound*)

Formalmente, Lario y Pérez (2001) señalan que la gestión de la cadena de suministro se define como “...una filosofía de gestión que busca unificar los recursos y competencias productivas de la empresa y sus aliadas, localizadas a lo largo de la cadena de suministro, dentro de un sistema altamente competitivo dirigido a desarrollar soluciones innovadoras y sincronizar el flujo de productos, servicios, e información hacia el mercado, para crear una fuente de valor para el cliente, única e individualizada...”.

De acuerdo con la definición anterior pueden observarse dos propiedades principales de la gestión de la cadena de suministro. Primero, se refieren a la cadena de suministro en acción. Es decir, se ocupa de la operación, integración y administración de las actividades logísticas implícitas en los procesos de negocio. Segundo, la gestión busca de manera concreta unificar los recursos y sincronizar los flujos (por ejemplo, productos, servicios e información) y actividades emergentes de las relaciones comerciales, en busca de aumentar el nivel de servicio al cliente y reducir los costes logísticos mediante el desarrollo de soluciones innovadoras.

2.1.2 Problemas y barreras de gestión

Estrictamente, la cadena de suministro no es una cadena de negocios de persona a persona, ni de relaciones entre una empresa y otra, sino que es una red de unidades de negocio con relaciones múltiples. La gestión logística de la cadena de suministro ofrece la oportunidad de capturar la sinergia de la integración administrativa intra e interempresarial.

En ese sentido, la cadena de suministro consiste en procesos de excelencia y representa una nueva manera de manejar las transacciones comerciales y relaciones con otras unidades de negocio, este hecho desde luego, hace que la gestión logística se haga más compleja y difícil de controlar presentándose ciertos problemas de coordinación.

Esta sección, justamente trata de los diferentes problemas que han sido identificados por diversos investigadores, los cuales resultan de interés para conocer el origen de la falta de coordinación de las actividades logísticas. En términos generales, son diversos los factores que impactan negativamente en el desempeño de la gestión de la cadena de suministro y su coordinación. Algunos de estos problemas, identificados

por tres estudios realizados en momentos diferentes (1992, 1999, y 2001), se presentan clasificados por su función (estratégicos, tácticos y operativos) en los cuadros 2.1, 2.2 y 2.3, respectivamente.

A nivel estratégico, Lee y Billington (1992) identifican problemas de gestión de la cadena de suministro relacionados principalmente con su diseño y las barreras de organización de las empresas. Fawcett y Magnan (2001) y Akkermans, *et al.* (1999), parecen estar de acuerdo con ello, sin embargo, agregan la ausencia de un mayor razonamiento estratégico por parte de los miembros de la cadena. Akkermans, *et al.* (1999), complementa problemas derivados de la escasez presupuestal y de las inversiones (véase, cuadro 2.1).

Cuadro 2.1
Problemas de gestión de la cadena de suministro a nivel estratégico

	Lee y Billington (1992) ^(a)	Akkermans, Bogerd, y Vos (1999) ^(b)	Fawcett y Magnan (2001) ^(c)
1	Barreras organizacionales	Histórica optimización local Temor a ser castigados por abrirse Pensamiento cerrado tipo funcional	Límites de la organización
2	Separación del diseño de la cadena de suministro del diseño operativo	Metas no comunes entre los participantes Insuficiente conocimiento de metas comunes	Metas inconsistentes de operación
3	Cadenas de suministro incompletas	Las expectativas de la cadena de suministro son muy bajas por los "socios" Suboptimización del desempeño de la cadena de suministro	Falta de normas claras en las alianzas
4	Ignorancia del impacto de la incertidumbre	Enfoque de corto plazo de las organizaciones Los "socios" no ven la importancia de compartir la información	
5	Inadecuada definición de servicio al cliente		No existe reflexión en términos del valor añadido en servicio
6		Insuficiente confianza para intercambiar información clave	Falta de iniciativa para compartir información
7		El presupuesto disponible para inversiones permanece bajo Retrasos en inversiones en la cadena de suministro	Falta de recursos en la C S
8		Falta de liderazgo en la cadena de suministro	
9		Poca confianza en las mejoras futuras	

Fuente: elaboración propia a partir de: (a) Lee y Billington (1992), (b) Akkermans, *et al.* (1999) y (c) Fawcett y Magnan (2001).

Por lo que respecta a los problemas de naturaleza táctica (cuadro, 2.2), los tres estudios parecen estar de acuerdo que la falta de un sistema de medición de estándares de desempeño es un verdadero obstáculo para la cadena de suministro. En términos generales, concuerdan que hace falta una mayor integración interna en las empresas, en torno a una mayor participación del personal a todos los niveles. La falta de estímulo

para una mejor gestión de la cadena de suministro, por parte del personal, suscita otros tipos de problemas tácticos, por ejemplo: políticas muy simplistas de gestión de inventarios, insuficiente comunicación entre los eslabones de la cadena, y en general métodos de análisis muy pobres.

Cuadro 2.2
Problemas de gestión de la cadena de suministro a nivel táctico

	Lee y Billington (1992) ^(a)	Akkermans, Bogerd, y Vos (1999) ^(b)	Fawcett y Magnan (2001) ^(c)
1	Inexistencia de métricas en la cadena	Las compañías no conocen sus propios costes y beneficios potenciales de la cadena de suministro	Medidas de desempeño no alineadas
2	Discriminación contra clientes internos	Poco interés y visión en la cadena de suministro, por parte de la alta dirección	Falta de participación de los empleados
		Actividad reactiva entre logística y ventas	
		Mejorar el desempeño en los niveles inferiores	
3	Políticas de inventarios simplistas		Problemas de gestión de la demanda de los clientes
4	Incorrecta estimación de los costes de inventarios		Procesos muy sencillos de costeo
5	Métodos de análisis de envíos incompletos		
6	Diseño del producto sin consideración de la cadena de suministro		

Fuente: elaboración propia a partir de: (a) Lee y Billington (1992), (b) Akkermans, *et al.* (1999) y (c) Fawcett y Magnan (2001).

Por su parte, el resumen de los problemas identificados del tipo operativo (cuadro, 2.3), y el orden en que aparecen, ofrecen la pauta para su análisis. Por ejemplo, la falta de adecuados sistemas de información (Lee y Billington, 1992) propicia deficiencias en la comunicación debido a la mala calidad de los sistemas empleados.

La carencia de información de calidad (y confiable) sobre los costes y beneficios, obstaculiza a su vez la adecuada toma de decisiones, dando lugar a fallos de sincronización entre las empresas, así como a conflictos personales y departamentales al interior de las mismas (Akkermans, *et al.*, 1999), ejerciendo una pobre coordinación de las actividades logísticas en la cadena de suministro (Lee y Billington, 1992), al mismo tiempo que se reducen las posibilidades para formalizar acuerdos para compartir riesgos y ganancias (Fawcett y Magnan, 2001), afectando negativamente de manera significativa los costes y funcionamiento del sistema operativo.

Cuadro 2.3

Problemas de gestión de la cadena de suministro a nivel operativo

	Lee y Billington (1992) ^(a)	Akkermans, Bogerd, y Vos (1999) ^(b)	Fawcett y Magnan (2001) ^(c)
1	Ineficientes sistemas de información	Falta de calidad en los sistemas de información y comunicación Mejorar el detalle de la información (costes y beneficios de la cadena de suministro) Insuficiente comunicación	Inadecuados sistemas de información
2	Pobre coordinación	Luchas acaloradas que dan paso a conflictos Fallas en la sincronización Falta de visibilidad logística en el resto de la organización Logística a la defensiva El proceso de ventas obstruye el desempeño de la cadena de suministro	Nulos esquemas para compartir riesgos y ganancias
3	Inadecuados sistemas de tiempos de entrega		
4		Costes demasiado altos en la cadena de suministro	

Fuente: elaboración propia a partir de: (a) Lee y Billington (1992), (b) Akkermans, *et al.* (1999) y (c) Fawcett y Magnan (2001).

Un estudio elaborado por Fawcett y Magnan (2001), explora las barreras que influyen en el desempeño de la cadena de suministro. A partir de sus resultados, concluyen que el 70% de los entrevistados opinan que el factor “*inadecuados sistemas de información*”, es un elemento que influye de manera significativa en la gestión de la cadena de suministro, afirmando que es una de las razones principales que obstruyen el buen desempeño de ésta. A este factor le siguen la “*falta de normas claras en las alianzas*” y “*metas inconsistentes*” en la operación. Estos dos últimos, estrechamente vinculados con los factores estratégicos de coordinación de la cadena.

2.1.3 Modelos de gestión de la cadena de suministro

Como respuesta a la problemática antes identificada, diversas empresas e investigadores han abordado el tema con el propósito de encontrar soluciones que les permitan coordinar correctamente las actividades logísticas de la cadena de suministro. Los tópicos más comunes que han sido estudiados son diversos, y cubren perfectamente cada una de las diferentes áreas que comprenden la cadena. En términos generales, son los siguientes:

- a. Localización de instalaciones y diseño de redes
- b. Logística de producción y operaciones

- c. Manejo de materiales y loteo (*order picking*)
- d. Gestión de inventarios
- e. Gestión de almacenes y estrategias de distribución
- f. Transporte y ruteo vehicular
- g. Tecnologías de la información y las comunicaciones

La figura 2.1 a continuación, resume la interrelación de los modelos de gestión de la cadena de suministro, y sus principales fuentes de información.

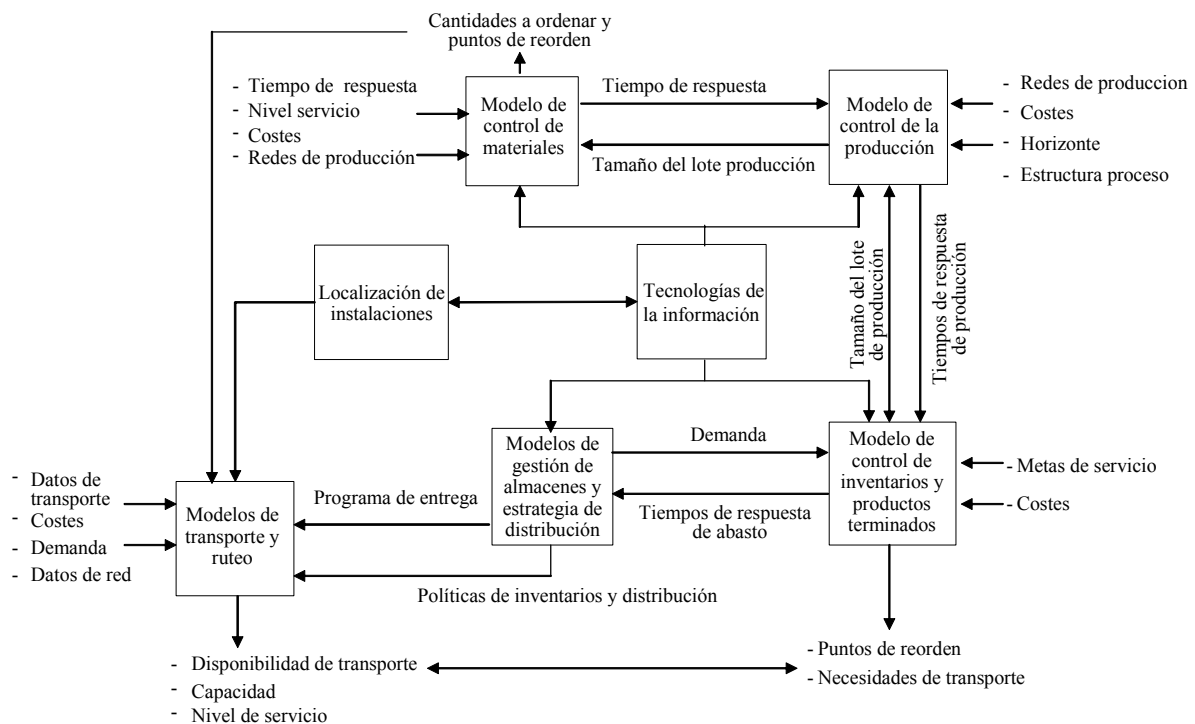


Figura 2.1
Relación de los modelos de gestión en la cadena de suministro

Fuente: Adaptado del documento original Villarreal (2005).

Son diversas las teorías y desarrollos que atienden a cada uno de los componentes de gestión de la cadena de suministro (figura 2.1), ya sea de manera individual o conjunta, involucrando conceptos de más de un modelo. Para el caso particular de la presente tesis, la modelación de la coordinación de inventarios entre clientes y proveedores y la combinación con los aspectos operativos del transporte, pone de manifiesto la posibilidad de lograr una mayor profundidad de análisis.

Para entender dicha asociación, a partir de la siguiente sección se presentan todos aquellos conceptos relacionados con ambas temáticas, las cuales permiten distinguir su relación intrínseca.

2.2 Coordinación de la gestión logística de la cadena de suministro

Antes de abordar el tema de la gestión de inventarios y la influencia del transporte, a continuación se trata el tema de la coordinación de la cadena de suministro, en donde, primero se establece el concepto de “coordinación”; después, se destaca el medio ambiente operativo y los mecanismos de coordinación empresarial. Más adelante se describen algunas de las estrategias que han surgido en la gestión de la cadena de suministro para la coordinación de los inventarios.

2.2.1 El concepto “Coordinación”

El sustantivo “coordinación” y el infinitivo “coordinar” se derivan de los términos latinos “cum” (= con, conjuntamente) y “ordinare” (= regular, poner en una línea, ordenar), y tienen el significado de una actividad reguladora, o de ordenación sobre varios elementos, indica que se busca que distintas actividades sigan un mismo ordenamiento, se orienten a los mismos objetivos, o se eviten conflictos entre ellas (Rodríguez, 1999).

Para Malone y Crowston (1993), la coordinación “es un proceso orientando a la gestión de la dependencia que existe entre las actividades”. Szlajfsztein (1997), distingue a la coordinación como “un proceso que consiste en “integrar” las actividades de departamentos independientes a efectos de perseguir las metas de la organización con eficacia”. Como puede observarse, ambas definiciones llevan implícito el concepto “proceso”¹ y su idea es una clara orientación hacia la integración empresarial.

Rodríguez (1999) afirma que los sinónimos más empleados y de mayor confusión son: "integración" y “cooperación”. Para el primer caso, Nagarajan, *et al.* (2000) definen que la integración en el contexto empresarial, consiste en reunir los

¹ Desde el punto de vista de la teoría de la coordinación, para Hayashi y Herman, (2002) un proceso consiste de tres tipos de elementos: recursos, actividades, y dependencias. Un recurso es producido y/o consumido durante un proceso. Por ejemplo, el material utilizado. Una actividad es una acción dividida que produce y/o consume recursos; por ejemplo, "el ensamble del material". La dependencia, es la interrelación que existe entre actividades o eslabones (proveedores, clientes, etc) para producir o consumir recursos; por ejemplo, la dependencia entre las actividades de "suministro de materiales" y "ensamble" (Malone y Crowston, 1999). Thompson (1967) identifica tres tipos de interdependencias con y entre las empresas: seriales o secuencial (flujo), conjuntas y reciprocas. La interdependencia serial o secuencial la define como "...la salida de una actividad, es la entrada de otra...". Las interdependencias conjuntas se refieren a que dos actividades están relacionadas a una tercera. Comparten una fuente común de recursos formando relaciones indirectamente independientes. Ambas actividades constituyen un sistema tecnológico o de gestión que permite obtener sólo un resultado. Interdependencias "reciprocas" se refiere a que existe un intercambio mutuo de entradas y salidas entre las dos partes. Es decir, una actividad puede estar presentando un servicio a otra y al mismo tiempo se sirve de ella. Las dos actividades pueden ser complementarias o desempeñar actividades dentro de un gran sistema.

componentes para formar sinergias como un todo. Afirman que la integración empresarial es la reingeniería de los procesos de negocio y los sistemas de información para mejorar el equipo de trabajo y la coordinación a través de las fronteras de la organización, aumentando la efectividad de las empresas como un todo.

Martínez (2001) define al sinónimo “cooperación” como “...un conjunto de acciones, conscientes y deliberadas, realizadas por dos o más empresas entre las que no existe subordinación, que optan por coordinar sus interdependencias a través de mecanismos que vinculan a las empresas en mayor medida que la relación de mercado sin que instaure en ellas una relación jerárquica...”. Rodríguez (1999) confirma que la cooperación, generalmente se emplea para designar actitudes internas que pueden favorecer la coordinación. De esta manera, puede deducirse que las relaciones de colaboración y la integración empresarial se conjugan, y utilizan la cooperación como un mecanismo que activa la coordinación. Sin embargo, los tres conceptos, planteados desde una óptica holista organizacional, deben buscar la eficiencia general de la gestión logística de la cadena de suministro.

En la “semántica” de la praxis empresarial, el concepto de “coordinación” se vincula al de la optimización de la asignación de recursos (por ejemplo, capital, servicios, medios disponibles, capacidades humanas, etc.), y se considera que la “coordinación” de las actividades logísticas de áreas parciales, especializadas del sistema productivo (por ejemplo: proveedores y clientes), es un medio más para la consecución de los objetivos de la empresa, y desde luego, de la cadena de suministro entera.

Desde la óptica de la cadena de suministro, las necesidades de coordinación se encuentran en correlación directa al nivel de complejidad del sistema cadena. Una mayor complejidad del sistema, exige: *a)* mayor especialización y profesionalización; *b)* mejor programación, planificación, formalización; *c)* diferenciación de funciones y roles personales; *d)* mayor número de niveles jerárquicos; y *e)* aumentar la delegación de decisiones (Rodríguez, 1999).

La idea de coordinar las actividades, busca atender los distintos ámbitos de problemas de un colectivo organizado en un entorno de planificación de gestión de la cadena de suministro. De este modo, en un contexto centralizado o no, el propósito

deberá estar orientado hacia los siguientes aspectos: *i)* dirigir a los miembros de la cadena hacia un mismo objetivo (planificación conjunta); *ii)* lograr cooperación en las tareas que desempeñan cada uno (cooperación); *iii)* concertar decisiones para evitar conflictos y consecuencias (negociaciones); *iv)* regular y reglamentar actividades de abasto (estrategias de colaboración); *v)* integrar los procesos de abasto (integración); y *vi)* controlar el nivel de abasto y de inventarios (coordinación), véase figura 2.2.

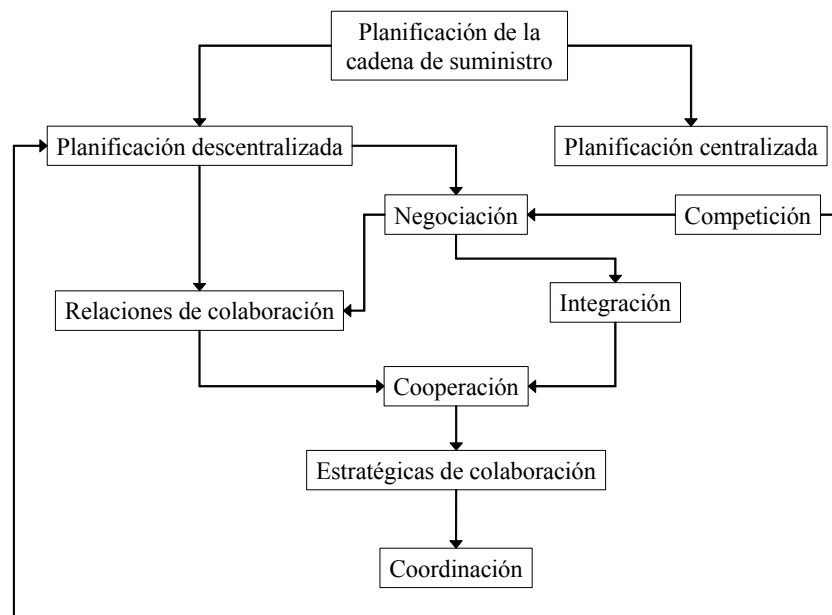


Figura 2.2
Taxonomía de la coordinación

A partir de los conceptos antes vertidos sobre la teoría general de la administración científica y en el contexto general de la cadena de suministro, en este trabajo se acepta la definición sobre el concepto de coordinación propuesta por Rodríguez (1999), la cual establece que es:

“...La actividad que gestiona la dependencia inter-empresarial consciente, orientada a cumplir los objetivos del sistema de empresas, que permite concertar y armonizar las actividades aisladas [por ejemplo, gestión de inventarios], tareas regulares [por ejemplo, actividades de abasto], y decisiones descentralizadas entre las empresas [por ejemplo, selección de transporte], generales o no, de unidades de negocio del mismo o distinto nivel, en orden para el logro de los objetivos superiores de cada miembro de la cadena, mediante el empleo de instrumentos estratégicos, estructurales, y tecnocráticos...”

La coordinación de las actividades logística de la cadena de suministro, recientemente ha recibido considerable atención en la gestión operativa. Algunos de los autores más renombrados que han estudiado el tema son: Christopher (1992), Cachon, (1999), Chopra y Meindl (2001), Brewer, *et al.* (2001), Fawcett y Magnan (2001), Bowersox, *et al.* (2002). En términos generales, estos autores buscan entender las ineficiencias económicas y operativas causadas a partir de las relaciones de dependencia de una empresa con respecto a otra.

Según Lee, *et al.* (1997a), los tópicos sobre cadena de suministro que incluyen esquemas de coordinación son tratados en la literatura en diversos campos. Destacan: la integración de canales (Clark *et al.*, 2001; Towill, *et al.*, 2002;), alianzas estratégicas y de colaboración (Bowersox, 1990; Kanter, 1994), información compartida y coordinación de la cadena de suministro (Lee, *et al.*, 1997a; Lee, *et al.*, 1997b; Lee y Whang, 1998; Chen, *et al.*, 2000; Zhao, *et al.*, 2002), planeación de la colaboración, pronósticos y suministro (Fisher, *et al.*, 1997; Vergin y Barr, 1999; Mark y Alexander, 2001; Holmstrom, *et al.*, 2002), respuesta eficiente al consumidor (*Kurt Salmon Associates*, 1993), y la administración de inventarios por medio del vendedor (*VMI*, por sus siglas en inglés) (Waller, *et al.*, 1999).

Con el propósito de conocer los paradigmas que dan luz a los esquemas de coordinación en la cadena de suministro, a continuación se lleva a cabo una breve descripción de la base teórica de las relaciones de colaboración y de la integración empresarial.

2.2.2 Las relaciones de colaboración, como elemento facilitador de la coordinación de la cadena de suministro

Christopher (1998) señala que muchos autores han reconocido que la gestión de la cadena de suministro debe ser construida a partir de la integración de los socios comerciales y que el propósito de los negocios es extenderse más allá de las fronteras de la empresa. Por tanto, afirma que las barreras funcionales internas están siendo erosionadas en favor de una gestión por procesos, provocando que la separación entre vendedores, distribuidores, consumidores y la empresa, disminuya gradualmente.

De igual modo Muckstadt, *et al.* (2001), reconocen que las oportunidades de eficiencia en la cadena de suministro tienden a ocurrir en la frontera de las compañías.

Señalan que las empresas pueden lograr ventajas competitivas cuando se enfocan a integrar sus sistemas organizacionales internos y sus procesos de negocio con sus socios comerciales en un sistema de colaboración. Jiménez (2004), establece que existen dos tipos de factores que las empresas deben considerar para el desarrollo de relaciones de colaboración y de integración empresarial: factores estratégicos y de integración funcional.

Por lo que respecta al conjunto de factores estratégicos, se refiere al diseño de políticas y objetivos comunes entre los miembros de la cadena, que incluyen: desde el alineamiento de objetivos hasta el desarrollo conjunto de productos, pasando por el desarrollo de modelos del tipo “ganar-ganar” (Thomas, 1992).

Por su parte, los factores de integración empresarial, están más enfocados al desarrollo de modelos que mejoren la sincronización e interrelación funcional de las empresas; buscan involucrar a los proveedores, fabricantes, distribuidores y clientes claves de la red de suministro, integrando incluso a transportistas (Esper y Williams, 2003), bajo un esquema de riesgos y ganancias compartidas (véase figura 2.3).

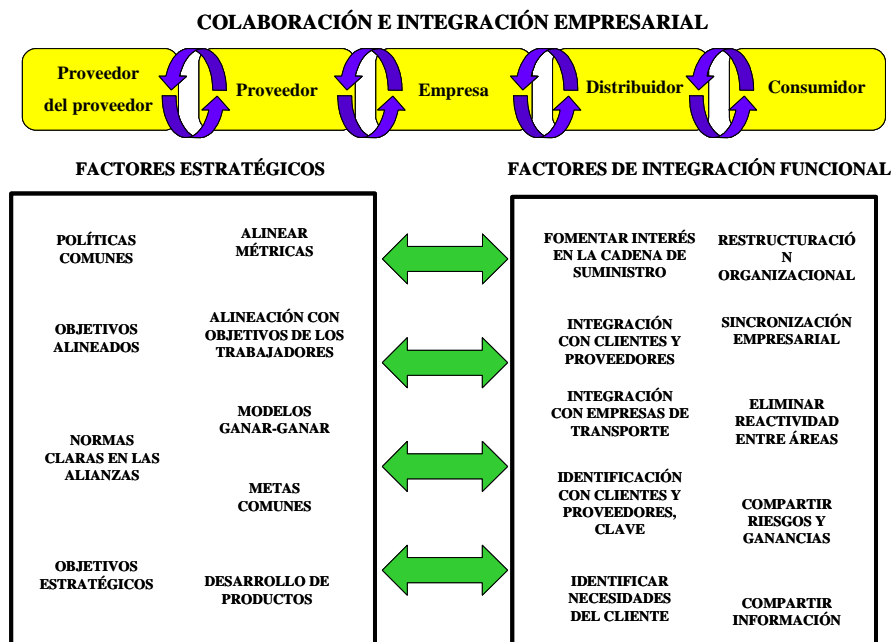


Figura 2.3
Factores de colaboración e integración empresarial

Fuente: Jiménez (2004).

En términos generales, las relaciones de colaboración se presentan en dos formas: internas y entre empresas (por ejemplo: proveedores y clientes). Las relaciones

internas, es un hecho que supone se dan por sí mismas, ya que se debe presentar de manera natural entre el personal de la empresa. Por lo que respecta a las relaciones entre empresas o inter-empresariales, surge a partir de tomar la decisión de “*hacer o comprar*”. Es decir, tomar la decisión de decidir interiorizar la producción optando por una estrategia de integración vertical hacia delante o hacia atrás, o descentralizar (*outsourcing*) las actividades no sustantivas hacia otras empresas (proveedores), especializadas con recursos y capacidades teóricamente suficientes.

2.2.3 Integración empresarial, facilitador de la coordinación de los procesos clave en la cadena de suministro

Como se dedujo en la sección 2.2, y aceptando que la coordinación de las actividades logísticas lleva implícito el concepto de integración, desde el punto de vista de la teoría de la gestión por procesos, la administración de la cadena de suministro puede definirse como “...la integración de los procesos de negocio clave desde el usuario final hasta los proveedores originales que entregan productos, servicios e información que agregan valor al consumidor y a otros interesados” (*International Center for Competitive Excellence*)².

En efecto, los procesos de gestión, también conocido como procesos de negocio, son las actividades que producen una salida específica de valor al cliente y sus componentes; son las variables mediante las cuales los procesos de negocio son integrados y gestionados a través de la cadena de suministro (Levi, 2003). De hecho, un proceso puede definirse como una cadena de eventos que buscan un resultado.

En la actualidad, la gestión de la cadena de suministro está siendo analizada desde este punto de vista. Diversos autores han identificado lo que para ellos son los procesos de negocios claves, que son utilizados para conformar lo que hoy se conoce como “*empresa extendida*”.

El término “*empresa extendida*”, en los últimos años se ha materializado como uno de los cambios más acelerados en el ambiente de los negocios, forzando a proveedores y fabricantes a trabajar más estrechamente, buscando la integración empresarial. Así, pueden crearse agrupaciones entre la empresa, sus proveedores y clientes conformando alianzas estratégicas de carácter permanente en el marco de

² *Global Supply Chain Forum*. <http://www.stanford.edu/group/scforum>

negocio establecido. Por ejemplo, una empresa puede aliarse con varios de sus proveedores y clientes para el desarrollo de un producto, acabándose la relación cuando se alcanza el objetivo de crear ese nuevo producto con las características requeridas, conformando lo que se conoce como “empresa virtual” (Lario, *et al*, 1999).

Es importante destacar que en la actualidad existe el interés de las compañías por gestionar las cadenas de suministro a las que pertenecen, enfocando muchos de sus esfuerzos y recursos a una mayor coordinación y optimización de los procesos de negocio claves, buscando la mejora continua de los factores tradicionales, tales como: producción, inventarios, distribución, compras y transporte, basado en el desarrollo de estrategias orientadas al proceso con un enfoque a la integración empresarial.

De acuerdo con Lario, *et al*. (1999), la visión pasa por la ingeniería y el modelado empresarial a través de la orientación a procesos de negocio que lleva a la integración empresarial formando grandes redes logísticas (por ejemplo, redes de proveedores y fabricantes, en el sector del automóvil y la aeronáutica; redes de fabricantes y distribuidores, en el sector de la distribución de productos de gran consumo, alimentación y bebidas, textil y confección, etc.), que se estructuran en empresas extendidas o virtuales. En este sentido, Vernadat (1996) define que la integración empresarial “...consiste en facilitar el flujo y control de la información y de los materiales a través de la frontera de la organización, vinculando todas las funciones necesarias y entidades funcionales heterogéneas (por ejemplo, sistemas de información, dispositivos, aplicaciones y personas), para mejorar la comunicación, cooperación y coordinación, de tal manera que las empresas se comporten como un todo integrado, y por tanto, aumenten su productividad, flexibilidad y capacidad para gestionar el cambio (o reactividad)”.

El concepto “integración empresarial” surgió a partir de los cambios recientes en los nuevos sistemas de producción, los cuales se desempeñan en mercados más abiertos y con una orientación a la satisfacción total del cliente. En general, se busca reducir los plazos de entrega por medio de la instrumentación de sistemas de información ágiles y eficientes, bajo una política global de respeto al medio ambiente (Ortiz, *et al*, 1999).

Para diversos autores, los diferentes procesos de negocio de una empresa deben estar orientados bajo un enfoque de integración, el cual tiene como meta fusionar los

procesos de negocio internos (intra-procesos) y sus procesos de negocio externos (inter-procesos) con sus socios comerciales. Afirman que la empresa integrada alinear su estrategia y su efectividad operativa como preámbulo para alcanzar sus objetivos, es decir, se busca integrar la estrategia, los procesos, las personas y la tecnología de las compañías (Ortiz, *et al*, 1999). Por todo lo anterior, se podría decir también que la coordinación es una herramienta más de la integración empresarial.

2.2.4 Medio ambiente operativo de la coordinación empresarial

La transición hacia una economía global de mercado, ha provocado que las compañías enfoquen sus esfuerzos cada vez más a nichos de mayor valor añadido. En consecuencia, es más común comprar componentes de proveedores (Womack, *et al*, 1990), y concentrarse en el “núcleo” del negocio; es decir, ser más eficiente en éste y dejar que otros se hagan cargo de los procesos complementarios, asumiendo posiciones de proveedores estratégicos (Greco, 1997).

De hecho, Jones y Kierzkowski (1990) establecen que una importante característica de la globalización del comercio, y en particular de las manufacturas, es el incremento en la fragmentación de la producción. Eugeni (1992), define esta situación como una de las cuestiones que han dado origen a una mayor profundización en la división internacional del trabajo, concluyendo que el medio ambiente del comercio actual ha entrado en una nueva etapa de la división del trabajo, pero ahora a nivel inter-empresarial, es decir, entre clientes y proveedores.

Al respecto, Rodríguez (1999) señala que “...la división del trabajo ha sido la primera forma histórica de organizar el esfuerzo de un colectivo orientado a la consecución de ciertos objetivos comunes...”. Afirma que “...formulado en categorías sistémicas, dividir el trabajo permite reducir la complejidad, asignando parcelas de problemas a unidades menores, a subsistemas especializadas, pero al mismo tiempo incrementa la complejidad interna del sistema, entre otros motivos por crear conflictos entre las decisiones de dichas unidades...”. Pero aclara que “...esta complejidad, en problemas de comunicación y problemas de sincronización de decisiones y actividades parciales, es el problema que debe reducirse mediante la coordinación de las decisiones-elementos del sistema que guían la co-operación dentro del todo organizado”.

En este sentido, diversos autores sostienen que el acelerado crecimiento del comercio internacional ha generado flujos de bienes que demandan altos niveles de coordinación entre diferentes países (Feenstra, 1998; Baldwin y Philippe, 1999; Meersman y Voorde, 2001; Feenstra y Gordon, 2001).

Por lo anterior, otros autores señalan que a partir del fenómeno de la globalización, se dio inicio a nuevas formas de organización logística y de gestión de los flujos físicos, fortalecidas por el desarrollo tecnológico del transporte y las comunicaciones (Gallardo, 1996).

No obstante dicho planteamiento, y a pesar de que Leiva (2004) reconoce que actualmente existe un fuerte incremento del uso de las tecnologías de la información en los procesos logísticos y de compras, que auguran un aumento del desarrollo de nuevos negocios; asegura que la componente tecnológica es tal vez la menos problemática, pues advierte que los elementos claves para la sustentabilidad y eficacia de la integración son más bien aspectos relativos a políticas y acuerdos necesarios entre las organizaciones. Es decir, el fomento de las relaciones de colaboración que dan origen a la coordinación (Lynch, 2001).

Desde esta perspectiva, se podrá entonces aceptar que la globalización trajo consigo nuevos modelos de articulación logística de la producción, los cuales, han permitido a las empresas avanzar hacia un cambio de su estructura de integración vertical hacia una horizontal, reduciendo el grado de independencia de cada miembro del sistema (Alasoini, *et al.*, 2001), propiciando a su vez, el desarrollo de diversas estrategias de coordinación. Simichi, *et al.* (2000) aseguran que dichos esquemas de articulación logística y las estrategias de coordinación, exigen que todos los eslabones de la cadena operen sobre la misma base de un sistema homogéneo de producción y control.

Como consecuencia de este nuevo entorno económico, las empresas han desarrollado mecanismos de articulación conformando grandes cadenas logísticas de suministro con sus proveedores y clientes, con eslabones dispersos en ámbitos geográficos distintos, dando lugar a la conformación de redes locales y globales de producción operadas con sistemas logísticos sumamente desarrollados (Lowe, M. y N. Wrigley 1996, Parker, 1997).

Meersman y Van de Voorde (2001), reconocen la existencia de una tendencia creciente de la logística internacional hacia la gestión de la cadena de suministro y una competencia basada en el tiempo. Tal situación exige por un lado, mayor eficiencia e innovación logística, y por el otro, un alto nivel de coordinación entre todas las etapas del proceso productivo (aprovisionamiento, producción, comercialización y distribución).

En palabras de Porter (1986) “...toda estrategia global se caracteriza por dos dimensiones o decisiones críticas estrechamente vinculadas: coordinación y configuración...”. Por coordinación, identifica el grado y forma de interrelación de las diferentes actividades de la cadena de valor. Un mínimo grado de coordinación indica autonomía e independencia de las actividades en cada lugar, contradiciendo en parte, la propia naturaleza de la empresa global. Por el contrario, un alto grado de coordinación será mayor cuanto más elevado sea el grado de globalización de la empresa.

Kjenstad (1998), señala que las compañías para mantenerse competitivas, están constantemente enfrentando desafíos para mejorar la calidad de su producto, reducir sus costes y el tiempo de ciclo en el mercado. Reconoce que “...tales desafíos no pueden ser superados con eficacia solo por medio de realizar algunos cambios al interior de las unidades de negocio, ya que dependen de manera crítica de las relaciones e interdependencias existentes entre las diferentes entidades, tanto internas como externas a una corporación determinada...”.

De hecho, Porter (2000) establece que se debe entender que “...la competitividad no es un fenómeno restringido a una empresa o a una industria, sino que es una cualidad de adaptación de las empresas...” (Innovación logística). De esta forma, se ha detectado que una empresa responde a cambios en el entorno económico en función de la capacidad de transmisión de la información, estímulos y controles que posea a lo largo de toda la cadena a la que pertenezca.

Como resultado, los beneficios de cualquier entidad de negocios en la cadena de suministro dependen directamente del desempeño de los otros (Kjenstad, 1998), y por supuesto de la buena disposición y habilidad para coordinarse. En este sentido, el alcance del concepto de competitividad parece estar orientado a la adecuación de la organización interna y de las transacciones externas.

Como respuesta a dicho cambio, y en el contexto de la logística empresarial, el impacto se ha centrado en tres tendencias de solución:

- a) Integración de las actividades logísticas a través de las fronteras de las compañías, orientada a lograr la reducción de los costes logísticos y el tiempo de ciclo. Un factor necesario para lograr dicha integración es la estricta coordinación entre proveedores y clientes a partir de la estrecha cooperación inter-empresarial (Christopher, 1998a, 1998b).
- b) Creciente especialidad de las compañías. Desarrollo dinámico del proceso de tercerización (*outsourcing*).
- c) Cambio e innovación. Desarrollo de sistemas de organización ágiles capaces de responder a cambios en la demanda de manera rápida y eficiente (Håkansson y Persson, 2004).

Por lo anterior, puede concluirse que la integración cliente-proveedor en el contexto de la cadena de suministro, demanda novedosos sistemas de coordinación de los flujos físicos de mercancías, como respuesta a la intensa competitividad empresarial. Dichos flujos, atendidos por esquemas obsoletos de organización, afectan de manera directa la integración de las actividades y por supuesto a los costes logísticos, en especial a los de inventario y transporte, independientemente de que existan nuevos desarrollos tecnológicos. Tal escenario, por supuesto exige un alto desempeño y el impulso de novedosas estrategias de coordinación de producción y distribución entre clientes y proveedores.

2.2.5 Mecanismos de coordinación empresarial

Son diversos los mecanismos utilizados por las empresas para lograr la coordinación entre clientes y proveedores. Como los más relevantes, destacan aquellos de carácter económico para motivar de manera más “fácil” la adopción de estrategias específicas de coordinación. En el ámbito de los acuerdos de colaboración empresarial. Chopra y Meindl (2001), identifican ocho mecanismos de coordinación: *a)* alineación de metas; *b)* incentivos de coordinación; *c)* mejoras en la exactitud de la información; *d)* diseño de sólo un control de suministro; *e)* mejora del desempeño operativo,

f) compartir más información, g) descuento basado en el volumen, y h) uso de sistemas multimodales de transporte.

a) *Alineación de metas.* Una manera de mejorar la coordinación en la cadena de suministro por medio de la alineación de metas e incentivos, puede llevarse a cabo fomentando la unificación de políticas en todas las áreas funcionales de la compañía y entre las empresas que forman la cadena. La clave es alinear los objetivos de las diferentes áreas o empresas participantes. Para asegurar lo anterior, es recomendable que todas las decisiones sobre las instalaciones, información, transporte e inventarios, sean evaluadas con base en la rentabilidad y no simplemente por el coste.

b) *Incentivos de coordinación.* El establecimiento de precios especiales a partir del tamaño del lote en la negociación comercial, es uno de los conceptos más utilizados para alentar la coordinación. Un proveedor, puede utilizar este mecanismo como elemento facilitador para determinar el tamaño del lote y los períodos de abastecimiento. Por ejemplo, puede ofertar una cantidad de descuento en función del tamaño del pedido, con el propósito de impactar favorablemente en los costes fijos asociados.

c) *Mejoras en la exactitud de la información.* Son varias las ventajas de compartir información con altos niveles de precisión. La primera y la más importante, es la reducción de la incertidumbre con un impacto positivo en la toma de decisiones coordinadas. Cuando las empresas en la cadena de suministro se esfuerzan por mejorar sus sistemas de información, su recompensa se ve reflejada en una reducción de sus costes de transacción debido a una mejora en la comunicación inter e intra-empresarial.

d) *Diseño de sólo un control de suministro.* Actualmente es muy común que las empresas concedan a sus proveedores ciertas actividades o decisiones que en otros tiempos les competían. Por ejemplo, las actividades de planeación del abasto de materias primas o productos terminados, por parte del proveedor, se han convertido en un mecanismo de gestión muy empleado por los clientes para reducir sus costes logísticos. El esquema más común está dirigido a reducir el nivel de inventario y sus correspondientes costes logísticos, el cual es puesto en marcha por medio del diseño de un sistema para compartir información, muchas veces confidencial. Obviamente, la

ejecución de este formulismo, exige un alto nivel de coordinación para garantizar el abasto de acuerdo con las necesidades reales.

e) Mejora del desempeño operativo. Se refiere a la búsqueda de una reducción del tiempo de ciclo para el abasto por medio de mejores instrumentos de comunicación, o una adopción de mejores sistemas de producción (por ejemplo, manufactura flexible o celular). De hecho, una mejora en los procesos de generación de ordenes, en la operación del transporte y en la gestión de inventarios, permite la reducción del tamaño del lote, y a su vez, una disminución de sus costes asociados utilizando alguna estrategia de coordinación.

f) Compartir más información. Hasta cierto punto es un mecanismo lógico y natural para lograr una mejor coordinación en la cadena de suministro. Sin embargo, es importante destacar que la información valiosa no sólo proviene de una situación actual, sino también del pasado. En general, algunas compañías potencian la coordinación de la gestión logística analizando los datos históricos de sus socios comerciales para tomar decisiones adecuadas.

g) Descuento basado en el volumen. El cambio de la política de descuentos basada en el tamaño de lote hacia otra basada en los volúmenes de venta, es un mecanismo que pretende eliminar aumentos innecesarios del tamaño del lote. Así, los descuentos por volumen se aplican a todos aquellos pedidos realizados en un período específico de tiempo (por ejemplo, un año) estabilizando el tamaño del lote y reduciendo la variabilidad de los pedidos.

h) Uso de sistemas multimodales de transporte. La combinación de los diferentes modos de transporte para trasladar mercancías, es un mecanismo de coordinación que puede permitir el abasto oportuno de los productos y la reducción del inventario. Evidentemente, la coordinación exige involucrar a las empresas de transporte y considerarlas como un elemento más de la cadena de suministro.

2.2.6 Estrategias de coordinación en la cadena de suministro

Paralelamente al acelerado crecimiento de la competencia mundial, se ha incrementado el interés por la gestión de relaciones de largo plazo entre los socios comerciales, con el fin de lograr beneficios conjuntos. Para lograr lo anterior, las

empresas han desarrollado algunas estrategias de coordinación con el propósito de mejorar sus actividades fundamentales.

Thomas y Griffin (1996), clasifican dichas estrategias en tres niveles operativos principales:

- a) Coordinación cliente-proveedor
- b) Coordinación producción-distribución
- c) Coordinación distribución-inventarios

En términos generales, puede corroborarse que cada uno de los tópicos de coordinación mencionados, han sido ampliamente explorados por investigadores y practicantes. Sin embargo, debido a que el campo de estudio evidentemente es muy extenso, aparentemente ninguno de ellos está totalmente cubierto. De acuerdo con los alcances de este proyecto de investigación, el interés de esta sección se centra en presentar las estrategias de coordinación más utilizadas por clientes y proveedores, en la gestión de sus actividades fundamentales.

En principio, puede definirse una estrategia de coordinación como el plan de largo plazo que permite enfocar los esfuerzos y alinear los recursos de manera productiva de un conjunto de procesos de negocio, subordinados a la estrategia operativa (modelo del negocio) adaptada a las características empresariales.

La primera iniciativa creada para permitir la integración en la cadena de suministro viene desde 1992, cuando 14 asociaciones patrocinaron el grupo llamado “*Efficiente Consumer Response Movement*” (*ECR-M*), con el propósito de liderar una transformación sin precedentes de las prácticas de los negocios (Robins, 1994; Harris y Swatman, 1997). A finales de 1992, el Movimiento *ECR-M* publicó un informe que sugería la práctica comercial óptima para la gestión de la cadena de suministro (Kurt Salmón Associates, 1993). En dicho informe se plantea que los beneficios de la cadena podrían lograrse por medio de cuatro estrategias principales:

- a). Promociones eficientes
- b). Resurtido eficiente
- c). Desarrollo eficiente del producto
- d). Reaprovisionamiento eficiente

Las tres primeras responden al predominio de aspectos de comercialización (*marketig*), mientras que la cuarta afecta esencialmente a la logística (Mejías y Prado, 2001). Según Barratt y Oliveira (2001), el reporte propuso la necesidad de “...desarrollar relaciones basadas en la confianza entre fabricantes y detallistas (incluidos los proveedores y clientes en general), para compartir información estratégica y optimizar todos los resultados en la cadena de suministro...”. A partir de esta iniciativa, una cantidad importante de iniciativas basadas en estrategias de colaboración han surgido.

Por ejemplo, Perona y Sacconi (2002) establecen un marco conceptual que ilustra los mecanismos de gestión o estrategias más utilizadas por las empresas para la conformación de relaciones de colaboración entre proveedores-clientes. En su documento, tales estrategias las definen como “técnicas de integración” y las clasifica en tres grandes grupos: estratégicas, tecnológicas y operativas. La mayoría de ellas buscando la coordinación de la gestión logística.

Por la parte estratégica, ha surgido la coordinación de la planeación estratégica, que involucra el desarrollo de planes de expansión de mercados y la coordinación del enfoque de los negocios (Merrilees y Seretny, 2000). Según Thomas y Griffin (1996), la coordinación en la cadena de suministro también incluye la decisión de abrir o cerrar plantas o centros de distribución, asignar equipo a instalaciones de producción, selección de la actividad a ser cedida a terceros (*outsourcing*), asignar la fabricación de un producto a una planta, diseñar conjuntamente un determinado producto, entre otras.

Por lo que se refiere a la estrategia tecnológica, se ha impulsado el rediseño conjunto de procesos, productos y de gestión de la cadena de suministro (Lee y Billington, 1992, Hewitt, 1994). Asimismo, se ha fomentado el desarrollo conjunto de nuevos productos con formalismos de co-diseño, ingeniería virtual e innovación tecnológica conjunta (Maggiore y Dominioni, 1999; Turnbull, *et al*, 1992; De Toni y Nassimbeni, 1997; Krause, 1998; Lazaric y Marengo, 1997).

Las estrategias relacionadas con la coordinación para la gestión de materiales, destaca los métodos de certificación de la calidad (Manuali, 1997), el libre paso de proveedores (De Toni y Nassimbeni; 1997), adquisiciones dictaminadas (Reguzzoni y Sacconi, 2000). Por su parte, en la coordinación de la producción y el control, se

utilizan las estrategias de ordenes globales, dimensionamiento conjunto de la capacidad de producción (Ferrozzi, *et al*, 1993), y colaboración en la planeación de pronóstico y suministro (Johnson, 1999; White, 2000).

Las estrategias más comunes para el diseño de la red de distribución son: la reconfiguración de la red de almacenes (Melachrinoudis, *et al*, 2003), acortamiento del canal de comercialización (Stalk y Haut, 1990; Cozzi, 1998; Magretta, 1998) y la estrategia de localización (Bartmess y Cerny, 1992; Zenobi, 1998). Por último, las estrategias de gestión de la distribución involucran la coordinación de la planeación de los requerimientos de distribución entre compañías (Christopher, 1992; Novack, *et al*, 1993); sistemas de multi-loteo (*multi-pick*) y multi-entregas (*multi-drop*) (Caputo, *et al*, 1996) así como, esquemas de gestión de transporte colaborativo (Cooke, 2000; Browning, 2004).

Cabe destacar que Esper y Williams (2003), reportan que una de las primeras extensiones del marco conceptual de las relaciones de colaboración en la cadena de suministro son las “*Relaciones de Colaboración para la Gestión del Transporte*” (Browning y White, 2000). Dicha estrategia tiene como meta desarrollar relaciones de colaboración entre proveedores, clientes, transportistas y proveedores de terceras partes logísticas, con el fin de mejorar el servicio, la eficiencia y los costes asociados con el proceso de entrega (Karolefski, 2001).

A nivel operativo, las estrategias se orientan a la coordinación proveedor-cliente, coordinación producción-distribución (Producción-VRP) y a la coordinación inventarios-distribución (multieslabones, multietapas, diferentes topologías, problemas de ruteo-inventario). En otras palabras, las estrategias operativas van desde la etapa de aprovisionamiento hasta la de distribución, pasando por el área de producción.

Entre las estrategias más comunes se encuentran aquellas con un enfoque en la coordinación de inventarios. Destacando el suministro ajustado (*Lean Replenishment*) que involucra técnicas como el “*justo a tiempo*”, entregas frecuentes (Isaac, 1985), programas de suministro continuo (Marien, 2001), inventario administrado por el vendedor (*Vendor Managed Inventory, VMI*) (James, *et al*, 1997; Gutman, 1997; Marien, 2001), estrategias con épocas comunes de resurtido (*Common Replenishment Epochs, CRE*), entre otras.

Para los efectos del presente trabajo de investigación, a continuación se describen brevemente algunas de las estrategias para la coordinación de inventarios más comúnmente empleadas en la actualidad.

2.2.7 Estrategias de coordinación para la gestión de inventarios

En general, las estrategias de coordinación están basadas en la teoría de juegos, y de manera especial en el juego de Stackelberg. En ese contexto, existe un líder del juego y seguidores. Su aplicación en la coordinación de la cadena de suministro supone que los socios comerciales adoptan alguna posición en particular, determinada generalmente por el poder de negociación, reflejada por algún parámetro específico (por ejemplo, el precio de los productos que se comercializan o por el diseño de la estrategia de gestión).

Durante el análisis del impacto de las estrategias mencionadas, es común encontrar que los investigadores lleven a cabo sus estudios intercambiando el papel que desempeñan los actores logísticos, es decir, estipulan que el proveedor actúe como líder y los clientes como seguidores, o viceversa.

Los estudios sobre la coordinación de inventarios plantean distintos escenarios en los que combinan diversos elementos de análisis. Los más comunes son: la demanda, que puede ser considerada como determinista (conocida) o estocástica, variable o constante.

El inventario, que es analizado bajo un entorno de revisión continua o periódica; la coordinación de inventarios se establece desde la estructura más simple, la cual comprende un proveedor y un cliente, hasta múltiples proveedores con múltiples clientes; en este entretejido, los estudios pueden considerar un producto o múltiples productos, con o sin faltantes o escasez permitida. Establecen horizontes de planeación finitos o infinitos. Los más complejos, involucran parámetros relacionados con el tipo de transporte empleado o elementos inflacionarios con carácter estocástico.

Las variantes anteriores son modeladas utilizando el marco conceptual de las estrategias más comunes utilizadas para coordinar los inventarios. Con el propósito de ilustrar las características que distinguen a cada una de éstas, a continuación se lleva a cabo una breve descripción de las más usuales.

2.2.7.1 Estrategia de “Desarrollo Conjunto de Ordenes (DCO)”

Este tipo de estrategia fue el primer intento por estabilizar los desequilibrios entre la oferta y la demanda. Su objetivo es muy claro y busca la uniformidad de los lotes de producción del proveedor (fabricante) y el tamaño de las ordenes del cliente. La estrategia reside en que el eslabón de la cadena de suministro con menor poder de negociación, emplee su pericia para lograr el equilibrio.

Fundamentalmente, este tipo de estrategia sigue el modelo clásico de lote económico (EOQ), el cual siempre es complementado con algún mecanismo de coordinación; siendo el más común, la compensación económica o descuento fijo en el precio (Goyal, 1976; Monahan, 1984; Banerjee, 1986; Sucky, 2002).

2.2.7.2 Estrategia “Justo a Tiempo” (JIT: Just in Time)

Dada la imposibilidad de instalar en Japón un sistema de fabricación en serie (producción en masa) como el de la *General Motors* en los Estados Unidos, durante el período de 1950 hasta principios de los años sesentas, la empresa *Toyota Motor Company* diseñó un sistema de producción de automóviles que pudiera ser rentable, teniendo en cuenta que la demanda japonesa de automóviles era pequeña y que no permitiría lograr las economías de escala requeridas para garantizar una eficiente producción.

Más específicamente, *Toyota* desarrolló un sistema de producción que minimizará el coste de producción total y logra economías de escala por la producción de muchos productos diferenciados en la misma cadena de producción. Esta empresa, a principios de los años setentas perfeccionó su sistema de producción, al que también llamó el sistema “*Kanban*” o sistema *JIT*. El sistema de producción *JIT* requiere que todas las partes necesarias y/o productos semielaborados sean entregados a donde son necesarios, cuando son necesarios, y en las cantidades necesarias (Nakamura, *et al*, 1998).

La estrategia *JIT* es la más popular y quizá una de las más empleadas en ciertos sectores industriales (por ejemplo, el automóvil). Su diseño está fundamentado en la mejora del flujo interno de las materias primas en las plantas de producción. Uno de los propósitos clave de la estrategia *JIT* es la eliminación del exceso de inventario en todas las partes del proceso de producción, calculando el movimiento de los materiales en

cada estación de trabajo para que éstos lleguen justo en el momento que son necesarios para la siguiente operación (Monden, 1994).

Mula (2004) pone en claro que los entornos de producción *JIT* están caracterizados por el trabajo en pequeños lotes y el control de la producción por medio de un sistema *Kankan* (sistema de arrastre). Una estación en la cadena de producción procesará un lote, sólo si éste es reclamado por la estación posterior. Bajo este sistema, calidad y fiabilidad se convierten en dos de las características esenciales de este proceso de fabricación. Si una estación no proporciona el lote requerido a tiempo, o falla en las especificaciones, la cadena tendrá que detenerse y se generarán grandes costes (González, 2000).

Con el sistema *JIT* se minimizan los inventarios en todas partes del proceso de producción, ayudando a las empresas manufactureras ha reducir sus costes de almacenamiento y de obsolescencia, así como ha mejorar el retorno de su activos. (Taylor, 2004). Este autor, señala que el inventario en proceso (*WIP*) es el más fácil de reducir usando la estrategia *JIT*. Sin embargo, por lo general es el más pequeño y de menor coste de los inventarios; en cambio, el inventario de materia prima y productos terminados requiere de ajustes en la forma en que los proveedores entregan y los clientes los reciben, respectivamente.

Con la finalidad de reducir el nivel del inventario de las materias primas, los fabricantes *JIT* trabajan con sus proveedores para cambiar los grandes embarques de materiales que van hacia los almacenes centrales, por embarques más pequeños y frecuentes que vayan directamente de los camiones al piso de fabricación.

Mula (2004), reporta que para atender este problema existe el sistema *JIT Kanban de transporte*. Dicho sistema autoriza el movimiento de un contenedor de piezas de un tipo (o varios), desde el sitio de almacenamiento (inventario) del proveedor, hasta el sitio de almacenamiento o procesamiento del siguiente eslabón (cliente).

2.2.7.3 “Respuesta Rápida” (*QR: Quick Response*)

En la actualidad, el intervalo entre la demanda de bienes de consumo y su abasto eficiente, es mayor que en cualquier otro momento, y se amplia cuando los consumidores son menos previsibles. Una manera por revertir esta situación se esta

dando con el uso de técnicas y estrategias de gestión. Al respecto, la estrategia “*Respuesta Rápida*” (*QR, Quick-Response*), es un paradigma de gestión que permite al sistema de suministro reaccionar rápidamente a los cambios en la demanda (Lowson, *et al*, 1999), es decir, su enfoque está dirigido a reducir el tiempo de ciclo de la orden.

La estrategia *QR* proporciona la capacidad suficiente para hacer de la información de la demanda, un elemento director para la toma de decisiones hasta el último momento posible en el tiempo, buscando: *i*) asegurar que la oferta sea maximizada y *ii*) que exista una reducción al mínimo de los tiempos de ciclo y los costes de inventario, aprovechando las ventajas competitivas otorgadas por la tecnología de la información. En especial, la estrategia hace hincapié en la flexibilidad y velocidad del producto a fin de cumplir con las demandas cambiantes de un mercado competitivo, volátil y dinámico (Christopher y Towill, 2001).

Básicamente, la estrategia se basa en compartir información entre los socios comerciales acerca de la oferta y la demanda de los productos, utilizando las tecnologías de la información (por ejemplo, Rastreo en Punto de Venta (PoS) o Intercambio Electrónico de Datos, EDI). Su operación consiste en actualizar constantemente las estimaciones de la demanda y el consumo en tiempo real, para luego lanzar nuevas ordenes al menor coste.

El código de barras en las mercancías permite rastrear todos los componentes y bienes terminados en cualquier parte de la cadena de suministro (visibilidad de la cadena de suministro); y establecer lotes y ordenes de pequeño tamaño, que aseguran que el ritmo de la demanda se equilibre (Burgess, *et al*, 2001).

Además de representar una estrategia, *QR* comprende una estructura, cultura y un conjunto de procedimientos operativos dirigidos a empresas que se integran en una red coordinada por medio de la transferencia de información e intercambio de beneficios mutuos.

2.2.7.4 Estrategia de “Reaprovisionamiento Eficiente” (*ER: Efficient Replenishment*)

El reaprovisionamiento eficiente (ER), es un proceso que representa el esfuerzo conjunto de proveedores y clientes para reducir los costes por ordenar (McKinney y

Clark 1995). Dong, *et al*, (2001), señala que la adopción de ER incluye simplificar la negociación (reducción de costes de transacción), optimizar el tiempo de ciclo para lanzar una orden, evaluación rápida de proveedores/clientes y su selección, automatizar el sistema de clasificación de proveedores/clientes, entre otros aspectos.

El reaprovisionamiento eficiente tiene como objetivo principal mejorar el proceso de satisfacción de la demanda (desde la generación del pedido hasta que la mercancía es colocada en la línea, facturada y cobrada) aplicando soluciones para minimizar los costes totales en la cadena de suministros, bajo una perspectiva de colaboración entre fabricantes y distribuidores (Sierra, 2002). En general, la estrategia está compuesta por las siguientes etapas: *a)* reaprovisionamiento continuo, *b)* cross docking, *c)* reingeniería de la cadena de suministros y *d)* reingeniería del proceso de pedidos (EDI).

El proceso de reaprovisionamiento eficiente, adopta una política de gestión de inventarios administrados por el proveedor (Johnson, 2002), por medio de la sincronización de la entrega de productos en forma continua correlacionada con las necesidades del consumidor. Esto permite al proveedor cierta libertad para expedir el envío o de otra manera cambiar la política de abasto (proceso), mientras se cumpla el nivel de servicio del cliente. La figura 2.4, ilustra el proceso de abasto para el caso de un proveedor y un cliente.

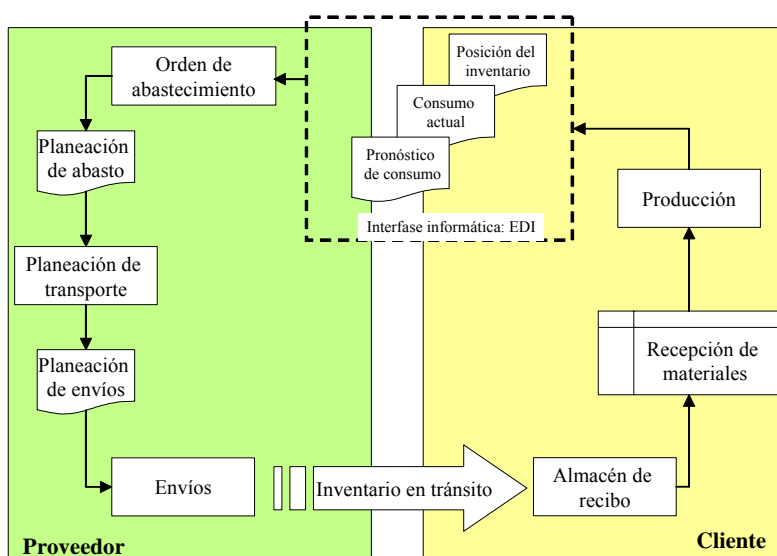


Figura 2.4
Proceso típico de reaprovisionamiento eficiente entre proveedor y cliente

Fuente: Johnson (2002).

Con esta estrategia, los proveedores están en la mejor posición para acortar tiempos de ciclo y administrar la componente de inventarios más apropiadamente, porque tienen un mayor control del proceso de la logística de abasto. Según Fisher (1997), en industrias, tales como los bienes de consumo empaçados, productos de asistencia médica y electrónica con altos niveles de certidumbre en la demanda este tipo de mecanismo es importante en la gestión de la cadena de suministro.

2.2.7.5 “Reaprovisionamiento Continuo” (CR: *Continuous Replenishment*)

Reaprovisionamiento Continuo es definido como “...la práctica asociada entre los diferentes miembros del canal logístico que modifican el procedimiento tradicional para la generación de ordenes, dirigida por el fabricante basado en la lógica del modelo *EOQ* (tamaño de lote económico), que introduce modelos de abasto administrados por él, apoyados en datos de la demanda actual y pronosticada...” (Cavalieri, *et al*, 2001).

Específicamente, es una extensión del anterior y su principal diferencia con la estrategia ER, es que en CR se establecen los acuerdos concretos sobre el nivel de los inventarios, el tiempo de entrega de las mercancías, propuestas de pedidos acordes a estacionalidades, nivel de la demanda, promociones, e incluso, recomendaciones sobre lo que tiene que comprar el cliente, trasladando la gestión del inventario directamente a los fabricantes. En concreto, la estrategia CR permite a los proveedores: *i*) eliminar costes por emisión de pedidos; *ii*) evitar envíos más frecuentes; y *iii*) ganar una mayor rotación de inventarios. Aunque se traslada la administración de los inventarios, el abasto de los productos no se hace a consignación, como en el caso de la estrategia “*Vendor Managed Inventory*”, que más adelante se describe.

En otras palabras, para los proveedores, recibir información de los clientes en tiempo real, puede garantizar una producción más eficiente y una mejor y más rápida adaptación a cambios de la demanda, antes de llegar a niveles de escasez o de abastecimiento excesivo. De este modo, la estrategia CR otorga a los proveedores la posibilidad de mejorar su ventaja competitiva, gracias a una reducción de su nivel de inventario.

En general, Cavalieri, *et al.* (2001) reconocen que estos esquemas de coordinación están basados en el uso de tecnologías de la información; consideran que la inversión

inicial en tecnología y recursos no deben ser una barrera para el desarrollo de este tipo de estrategias. Sin embargo, señalan que las dificultades pueden presentarse durante el establecimiento de las relaciones de colaboración, debido principalmente a la inercia organizacional derivada de la adversidad que presenta la cultural natural. En particular, para aquellos socios comerciales que operaran en los niveles inferiores en la cadena de suministro.

2.2.7.6 “Planeación, Pronóstico y Reabastecimiento Colaborativo” (CPFR: Collaborative Planning, Forecasting and Replenishment)

Puede decirse también que esta estrategia constituye una extensión de las anteriores. Los fabricantes y distribuidores comparten un sistema de previsión de ventas. CPFR es un conjunto de prácticas de negocio nuevas o perfeccionadas, apoyadas en *Internet* y las tecnologías de la información. Reduce de forma drástica los inventarios globales por medio del desarrollo de técnicas de colaboración y por compartir información entre clientes y proveedores. Se basa en un conjunto de modelos basados en la tecnología y en los procesos de negocio aplicados a las actividades de la cadena de suministro.

Todos los eslabones de la cadena introducen sus pronósticos y resultados en *Internet*. El *software* CPFR disponible, analiza dichos datos y alerta a cada socio sobre situaciones excepcionales que puedan afectar el pronóstico, promoviendo la búsqueda de soluciones en colaboración. Su misión es compartir información de forma dinámica integrando los procesos de oferta y demanda (Digitala, 2005).

El cliente y el proveedor trabajan en colaboración para satisfacer la demanda del cliente final. El modelo CPFR se basa en el desempeño conjunto de las siguientes cuatro actividades (VICS, 2004):

- a) Planeación y estrategias. Establecen las reglas de colaboración y determinan la mezcla de productos y los períodos de lanzamiento.
- b) Gestión de la oferta y la demanda. Pronostican la demanda del consumidor, así como los requerimientos de ordenes y envíos en un horizonte de planeación.
- c) Ejecución. Lanzan pedidos, preparan y entregan los embarques, recibo de productos e inventario sobre anaqueles de venta al público, registran transacciones de ventas y pagos realizados.

- d) **Análisis.** Monitorean la planificación y las actividades de ejecución para condiciones excepcionales. Agregan los resultados y calculan los indicadores de medición claves. Ajustan proyectos para buscar resultados en un esquema de mejora continua.

Dicho modelo se complementa con una serie de tareas que realizan de manera individual y otras de manera conjunta. De acuerdo con el *Committee Grocery Manufacturers of America* (GMA, 2002), los beneficios más importantes de esta estrategia son: *i*) reducción de inventarios de los clientes y proveedores; *ii*) abastecimiento en función de las necesidades reales de la cadena de suministro; *iii*) identificación inmediata de cualquier discrepancia entre los pronósticos, los inventarios y las ordenes de compras; y *iv*) mejorar la satisfacción de los clientes.

2.2.7.7 “Inventario Administrado por el Proveedor” (VMI: Vendor Managed Inventory)

La gestión de inventarios por parte del proveedor (*VMI*) es una iniciativa de las más recientes en la cadena de suministro. Aquí, el proveedor está autorizado a manejar los inventarios de acuerdo a las unidades de reserva convenidas en el almacén del cliente. Este tipo de estrategia es también conocida como “ventas a consignación”. En términos generales, puede considerarse como una extensión de la estrategia *CR*.

Zanoni y Zavanella (2003) consideran que una política de ventas a consignación, está basada en las siguientes tres reglas: *i*) el proveedor garantiza a su cliente un nivel mínimo (*s*) y máximo de inventario (*S*); *ii*) el inventario es ubicado cerca de la línea de producción del cliente y *iii*) la posibilidad de utilizar el material diariamente de acuerdo a sus necesidades.

Esencialmente el *VMI* es un arreglo en donde el propietario de los bienes (“*consignador*”) deposita sus productos en el sitio de su socio comercial (“*consignatario*”) para su uso o venta (Fagel, 1996). Típicamente, el programa involucra un proveedor que monitorea el nivel de inventario en el almacén del cliente y asume la responsabilidad del mismo para lograr metas específicas, valiéndose para ello de avanzados sistemas de información (Copacino, 1993).

En definitiva, un proveedor *VMI* tiene la libertad de tomar las decisiones de reabastecimiento “*río abajo*” sobre las cantidades y tiempo de suministro en lugar del cliente (Çetinkaya y Yee, 2000). En palabras de Dong y Xu (2002), afirman que existe evidencia de que el consignatario puede disfrutar de reducciones en los costes de almacenamiento y algunos costes operativos, más los beneficios del flujo de efectivo.

De acuerdo con Zanoni y Zavanella (2003), en la estructura de costes de una política de consignación, el coste de inventario por unidad (h) está constituido por dos componentes principales: uno financiero h_{fin} y otro de almacenaje h_{alm} . Bajo un acuerdo típico de suministro, el proveedor (V) no posee costes por inventario después de entregar los bienes al cliente (B), es decir, se encuentra en una situación donde $h_{fin}^V + h_{alm}^V \leq h_{fin}^B + h_{alm}^B$, principalmente por el componente financiero, el cual aumenta “*río abajo*” de la cadena de suministro. Por el contrario, en el contexto de la estrategia *VMI*, el consignador (proveedor) soportar los costes financieros correspondientes, mientras que el cliente los costes de almacenamiento (véase cuadro, 2.4).

Cuadro 2.4

Costes relevantes con acuerdo típico y bajo una política de abasto a consignación

		Posición de los productos			
		Acuerdo típico		Abasto a consignación	
		Proveedor	Cliente	Proveedor	Cliente
Costes relevantes	Proveedor	$h_{fin}^V + h_{alm}^V$	0	$h_{fin}^V + h_{alm}^V$	h_{fin}^V
	Cliente	0	$h_{fin}^V + h_{alm}^V$	0	h_{alm}^B

Fuente: adaptado de Zanoni, y Zavanella (2003).

El proveedor bajo este tipo de estrategia parece estar en desventaja, sin embargo, diversos autores señalan que probablemente obtenga oportunidades para mejorar su producción y hacer más eficiente su comercialización, por ejemplo, disponer de espacios para lanzar otros productos; puede manejar un plan de producción más flexible para disminuir sus costes; y de manera directa, buscar reducir su coste de inventario por unidad. Ciertamente, la estrategia *VMI* permite una evaluación sistemática de los beneficios, tanto de proveedores como de los clientes, facilitando automáticamente la coordinación de la cadena de suministro (Dong y Xu, 2002).

Dong y Xu (2002) concluyen que los beneficios del cliente siempre se mantendrán altos, mientras que los del proveedor estarán variando. Demuestran que en el corto plazo los costes totales del sistema se reducen. Añaden que, bajo ciertas condiciones de

costes entre clientes y proveedores, se podría reducir el precio de adquisición y los beneficios del proveedor.

En el largo plazo, estiman que los beneficios del proveedor podrían aumentar más que en el corto plazo. Otros autores, señalan que la volatilidad de la demanda no juega un papel importante en la determinación de ventajas probables; los negocios con volatilidad baja y alta demanda se benefician más o menos igual (Waller, *et al*, 1999).

2.2.7.8 Estrategia “Gestión de la Disponibilidad por el Proveedor” (SMA: *Supplier Managed Availability*)

Esta clase de estrategia es una extensión del *VMI* y está basada en un importante cambio de mentalidad. El *inventario* en el sitio “*río abajo*” no es la meta en sí mismo (por ejemplo, si el inventario en un nodo “*río abajo*” es un distribuidor, el inventario en sí actúa como facilitador de las ventas); el verdadero objetivo es la disponibilidad del producto *cuando y solamente cuando* se necesita en un sitio determinado.

Algunas ideas para aumentar la flexibilidad del proveedor en este contexto son: uso de transportes rápidos, planeación de un excedente temporal de la capacidad del proveedor, planeación de producción temporal acelerada, posesión de algún inventario no comprometido en el sitio del proveedor. En palabras de Hausman (2003), dichas alternativas colocan al proveedor en una situación complicada, pues deberá desarrollar algún esquema de selección (*tradeoff*) que le permita tomar una correcta decisión.

El cambio de mentalidad de “*inventario*” a “*disponibilidad*” permite al proveedor tener en cuenta diversas formas para atender la variación de la demanda; el resultado de ello es un inventario más bajo que el *VMI* “estándar”. Por ejemplo, puede ser más económico para el proveedor invertir en aumentar relativamente su capacidad para ser empleada cuando sea necesaria, en vez de mantener grandes cantidades de inventario en el sitio del cliente; o el proveedor puede decidir pagar transportes más rápidos cuando sea necesario.

Sin estrategia alguna el proveedor buscará suministrar pedidos según su óptimo local, sin considerar los datos de la demanda del cliente. Las falsas señales de la demanda y la ausencia de compartir información, pueden activar el “*efecto látigo*” y provocar un aumento artificial de la demanda, altos costes e interrupciones.

Como ya se mencionó, en la estrategia *VMI* el proveedor busca actualizar el nivel de inventarios en el sitio del cliente en tiempo real, según los datos de consumo. Los proveedores utilizan la información para anticipar las necesidades de suministro, y optimizar su producción y distribución para hacer frente a esas necesidades.

Sin embargo, en la estrategia *VMI* es común acordar niveles mínimos y máximos de inventario limitando las acciones de los proveedores. Para muchos clientes, este escenario les da confianza de que nunca estarán por debajo de sus expectativas o niveles de comodidad. Con la estrategia de “*Gestión de la Disponibilidad por el Proveedor*” (*SMA*), puede irse más allá, enfocándose a los inventarios y en la disponibilidad, eliminando los requerimientos mínimos y máximos de inventarios.

Lo anterior, permite al proveedor operar con niveles de inventarios más bajos y cumplir con la disponibilidad de los productos (véase figura 2.5). De manera alternativa, los niveles de inventario mínimos y máximo bajo *SMA* pueden aceptarse, pero sin ser tan restrictivos como en la estrategia *VMI*.

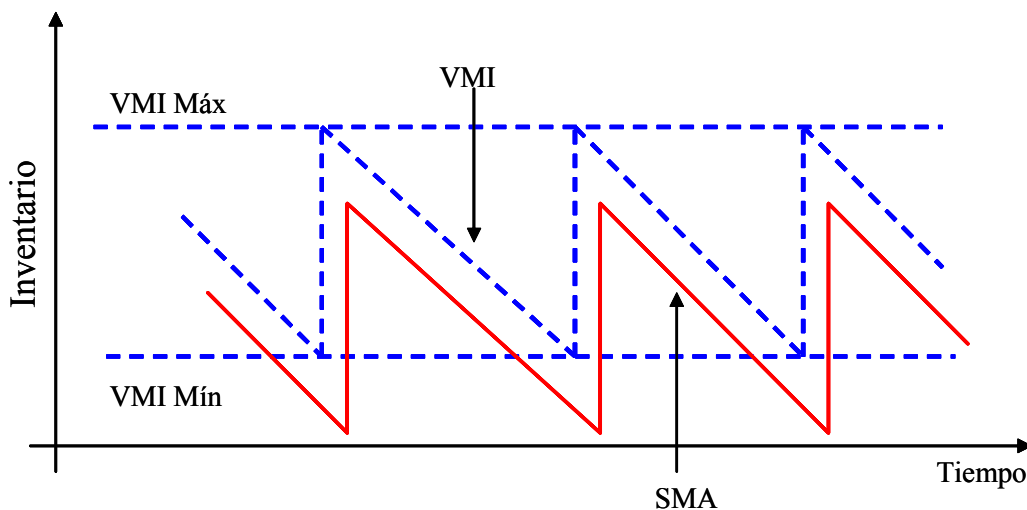


Figura 2.5
Estrategias *VMI* y *SMA*

Fuente: Hausman (2003).

2.2.7.9 Estrategia “Épocas Comunes de Resurtido” (ECR) (*CRE: Common Replenishment Epochs*)

La estrategia Épocas Comunes de Resurtido (ECR) busca coordinar los inventarios de proveedores y clientes por medio de un descuento en los precios y con el establecimiento de períodos específicos de abasto. El esquema original está basado en la existencia de un proveedor y múltiples clientes.

El proveedor propone a sus clientes establecer períodos de surtimiento de acuerdo a su política óptima de resurtido y con ello, buscar aprovechar las economías de escala de la producción, de la gestión de pedidos (consolidación) y del transporte. A cambio, propone a los clientes un descuento en los precios por aceptar dicha estrategia y con ello compensar los costes adicionales que le causa el sobre inventario.

Por lo tanto, el cliente que acepte dicha propuesta sólo podrá hacer pedidos en los períodos y cantidades que el proveedor le indique, sin embargo, deberá asegurar que los ahorros ofrecidos por el proveedor son más altos o al menos iguales que los costes de operación que le produce la estrategia. En términos generales, la coordinación por Épocas Comunes de Resurtido busca minimizar los costes totales de sistema (cliente-proveedor) y se caracteriza por los conceptos que se ilustran en la figura 2.6.

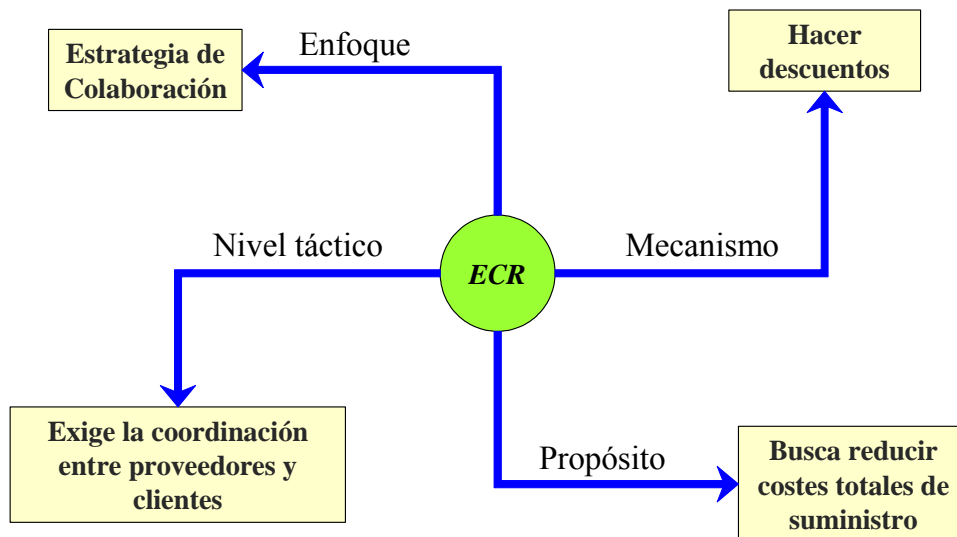


Figura 2.6
Características principales de la estrategia
“Épocas Comunes de Resurtido”

La estrategia ECR permite adoptar nuevas prácticas en la gestión de la cadena de suministro, abordar nuevos retos de competitividad, integrar diversos actores de la cadena, apoyar las políticas de inventarios y mitigar el mito de los sistemas JD Edwards, Sap, etc. También se ha demostrado que ECR es competitiva en costes.

En particular, la estrategia ECR es la que interesa en este trabajo de investigación y por lo tanto, más adelante se trata con mayor profundidad a través del análisis de la literatura disponible donde es utilizada.

2.3 Coordinación de inventarios en la cadena de suministro

El tema de la gestión de inventarios, es por excelencia uno de los temas más atendidos por los académicos, y de mayor interés para los industriales. Ganeshan y Harrison (1995) señalan que el coste de los inventarios puede estar entre el 20% y el 40% de su valor, y que su eficiente administración se vuelve un factor crítico en la operación de la cadena, y estratégico para lograr las metas globales de gestión.

Por el motivo anterior, en esta sección se hace un breve análisis sobre el tipo de inventario que se presenta en las diferentes fases del sistema y se identifica la relevancia de su coordinación; al final se describen los modelos más comunes de coordinación (centralizados y descentralizados).

2.3.1 Sistema jerárquico de inventarios en la cadena de suministro

En términos generales, en una empresa industrial más o menos compleja se tienen sistemas de aprovisionamiento a varios niveles o entre departamentos, conocido como inventario multinivel. El problema que plantea dicho inventario supone la minimización del coste total a todos los niveles.

Así, los inventarios más comunes en cada nivel son: (1) inventario de materias primas (artículos para producción: componentes, subensambles; artículos para oficina y herramientas); (2) inventario de productos en proceso; (3) inventario de productos terminados; y (4) inventario en tránsito (véase figura 2.7).

Por materia prima puede entenderse como aquellos productos comprados a proveedores para ser usados como insumo en el proceso de producción y transformación a bienes terminados. Los productos en proceso (*WIP*, por sus siglas en inglés) se refieren a los bienes parcialmente terminados que se encuentran todavía en el proceso de fabricación. Los productos terminados son bienes finales disponibles para venta, distribución, almacenaje y consumo.

El inventario en tránsito, está compuesto por aquellas mercancías que se encuentran en la ruta de transporte para su consumo final. Hay quienes consideran las provisiones como otro tipo de inventario, y éste se refiere a todo artículo utilizado para el mantenimiento, reparación, y elementos de apoyo para las operaciones (es decir,

lápices, papel, bombillas, máquina de escribir, cintas, y artículos de mantenimiento de instalación), desde luego este tipo de inventario no es considerado en este trabajo (Tersine, 1988).

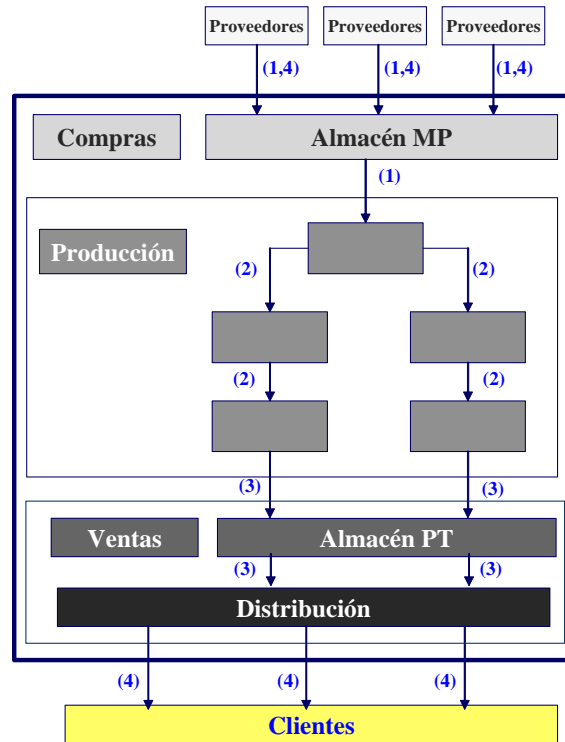


Figura 2.7
Tipos de inventario

Una situación relevante de este esquema de inventarios reside en que cada vez que los materiales cursan una nueva área funcional, los productos poseen una mayor densidad económica, lo que hace más significativa la necesidad de lograr la mejor gestión de inventarios por medio de la integración de los procesos entre las áreas funcionales de la empresa y por supuesto entre proveedores y clientes. En tal caso, ello puede ayudar a reducir los altos costes de capital que produce el almacenaje de productos terminados. En la figura 2.7, el sombreado en gris hasta el negro total así lo pretende ilustrar.

Por lo anterior, un problema común de la gestión de inventarios, se basa en determinar en qué punto del proceso de producción deben formarse, y en qué deben consistir. Cuanto más elaboradas estén las mercancías mantenidas en existencia, menor será el retraso en el suministro a clientes, pero mayores serán los costes de capital por almacenaje; lo contrario ocurre con las mercancías menos elaboradas (en forma de materias primas en el caso extremo).

El problema planteado es más complejo cuando el sistema de inventarios tiene carácter multieslabón. Es decir, cuando el suministro involucra más de un elemento por eslabón. Por ejemplo, cuando existe más de un proveedor que abastece los componentes a un fabricante para su ensamble, y que éste a su vez, envíe sus productos terminados a más de un distribuidor. Este tipo de esquemas es complejo debido a que cada miembro del eslabón manejará distintos niveles de inventario.

Por lo anterior, la coordinación de inventarios y sus flujos se convierte en un desafío clave de la gestión de la cadena de suministro. Cuanto mayor sea el número de elementos por eslabón, mayor será el coste de almacenaje en la cadena, pero una buena coordinación de inventarios permitiría incluso reducir las ventas perdidas por la escasez.

Con base en lo anterior, Hopp (2004) señala que las cadenas de suministro pueden estar estructuradas de muy diversas maneras. Afirma que la configuración de la mismas esta influenciada por el diseño del producto, geografía del mercado, las expectativas del cliente, así como de las decisiones de gestión. En una estructura específica pueden existir muchas variaciones sobre las estrategias de inventarios, políticas de envío, procedimientos de comunicación e información y otros parámetros.

Algunas posibilidades se muestran en la figura 2.8. Cabe señalar que por la complejidad que presentan, los sistemas de gestión multi-eslabón actualmente han recibido mucha atención.

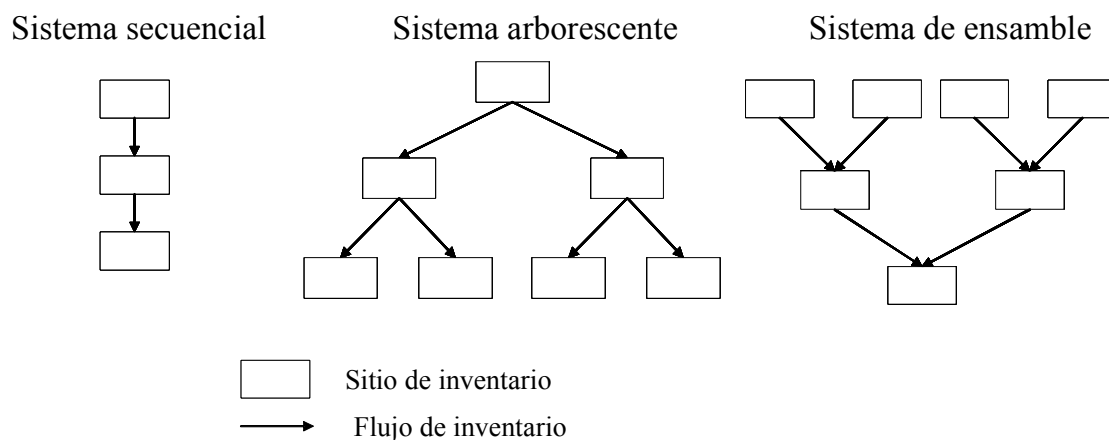


Figura 2.8
Ejemplo de configuraciones de cadena de suministro multi-eslabón

Fuente: Hopp (2004).

Desde el punto de vista del flujo de las materias primas y los productos en el proceso de producción, Hopp (2004) señala que los inventarios se dan por los “*cuellos de botella*” debido al uso intensivo de los recursos asignados (por ejemplo, maquinaria, equipo, servicios de apoyo, etc.) provocando colas de espera debido a sus limitaciones de capacidad.

Hopp (2004) afirma que variaciones en la demanda, tiempo de procesamiento, tiempo de entrega y otros factores afectan también a los flujos, requiriéndose de puntos de almacenamiento (*buffering*) en forma de inventario, capacidad o tiempo. Concluye que la variación impacta principalmente aquellos recursos que son altamente utilizados.

En la cadena de suministro la operación es muy similar a los flujos de producción. También se presentan puntos de inventario que surgen por la necesidad de almacenar productos, realizar entregas rápidas, reaccionar a las variaciones de la demanda, o como consecuencia de alguna estrategia de gestión. En este contexto, Hopp (2004) mira a la cadena de suministro como un sistema jerárquico de inventarios, es decir, cada eslabón recibe su inventario desde el anterior y entrega inventario al eslabón inferior (véase figura 2.8 anterior).

No obstante, la gestión de inventarios en la cadena de suministro es una situación que se torna muy compleja, y por lo tanto, el estudio por segmentos o descomposición, es una alternativa para la definición de políticas adecuadas de cooperación. Así, puede pensarse en dividir una cadena de suministro compleja en una serie de piezas más simples, constituidas por un proveedor que abastece a un cliente y que éstas se encuentren realmente coordinadas. Esto puede ayudar a reducir dicha dificultad y solo se espera que se desarrollen las estrategias más adecuadas de coordinación entre cada par de eslabones de la cadena entera (véase figura 2.9).

Por todo lo anterior, el problema podría ser más específico y se podría encasillar en determinar, entre el cliente y el proveedor ¿Dónde se deben formar los inventarios? La respuesta a esta interrogante evidentemente no es sencilla puesto que obviamente ninguna empresa querrá cargar con lo costes que ello representa, por lo tanto, el diseño de una estrategia de gestión entre las partes se justifica plenamente.

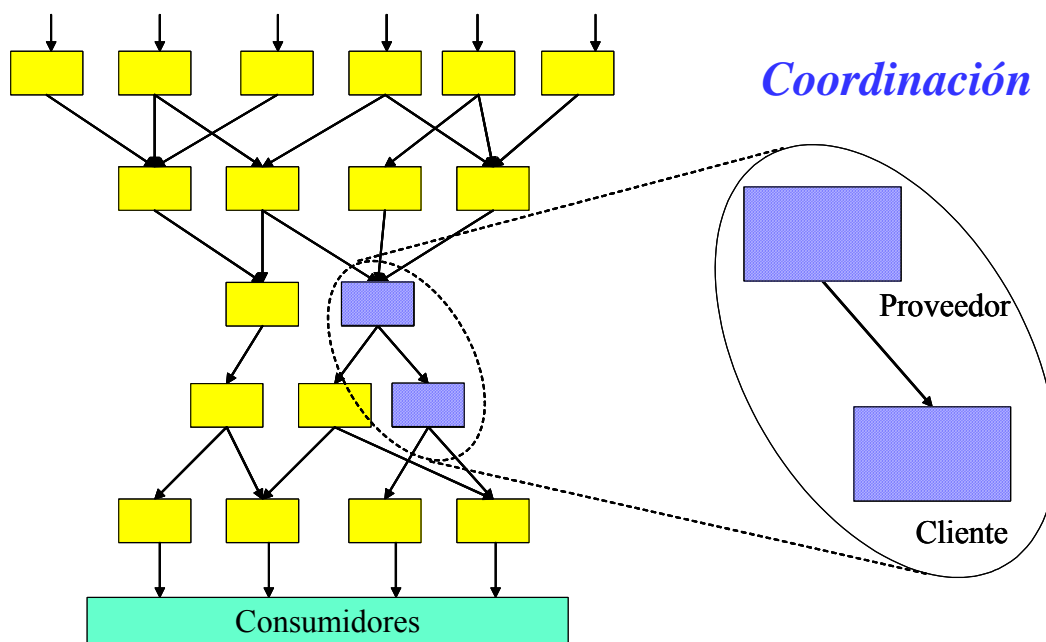


Figura 2.9
Segmento de estudio de la cadena de suministro

2.3.2 Relevancia de la coordinación cliente-proveedor en el sistema de inventarios

La efectiva coordinación juega un papel muy importante en el éxito de la operación de modernos sistemas de inventario. Si tal coordinación no existe, el proveedor y cliente actúan de manera independiente y toman decisiones que maximizan sus respectivos beneficios o minimizan sus costes individuales. El resultado puede que no sea el óptimo si se considera a la cadena de suministro como un todo (Chan y Kingsman, 2005). Por lo anterior, la relevancia de la coordinación de inventarios en la cadena de suministro, reside en lograr resultados conjuntos que maximicen los beneficios de cada uno de los miembros de la cadena entera.

Entre los aspectos que apoya la coordinación proveedor-cliente en la cadena de suministro, se encuentran el acortamiento de los tiempos de entrega, mayor confiabilidad de los envíos, reducción de costes (transporte, producción, ordenar), mejora en la programación de la producción y de los envíos, mayor rentabilidad de la cadena, etc.

En la actualidad, uno de los temas más discutidos es el relacionado con la coordinación de inventarios. Para ello, se han desarrollado una cantidad importante de

modelos enfocados a determinar el tamaño óptimo del lote de pedido y de producción, para el cliente y el proveedor, respectivamente.

En particular, la justificación técnica y económica de los esquemas de coordinación de inventarios, comienza abundar. El caso específico de una iniciativa “*justo a tiempo*” demostró que si se impone la política óptima del cliente (órdenes más frecuentes y pequeñas), el proveedor tendría un sobre coste de alrededor del 71% en relación a su política óptima.

Por su parte, los costes totales de sistema estarían arriba del 6.9% de la política óptima conjunta. Para el caso de que el proveedor impusiera su política óptima (suministrar órdenes grandes y pocos envíos), el cliente estaría 165% por arriba de su política óptima. Mientras que los costes totales del sistema estarían por arriba del 68% de la política óptima conjunta (Pawlowski y Akbulut 2002). Por lo tanto, dicho estudio evidencia que la implementación de una política de inventarios conjunta podría permitir la reducción de los costes totales del sistema.

Vale decir que la mayoría de los modelos de coordinación de inventarios se encuentran inmersos en la teoría de control de inventarios del tipo multi-eslabón, en el contexto del problema conocido como “tamaño de lote” (*Lot-Size Problem; LSP*). En el ámbito de la cadena de suministro (*enfoque inter-empresarial*), tal situación es evidente puesto que se busca resolver el problema de inventarios entre proveedores y clientes.

En general, los modelos de coordinación de inventarios buscan evaluar el impacto de las estrategias en el desempeño de la cadena de suministro, desde el punto de vista económico y de gestión. Por ejemplo, reducción de los costes por: procesar órdenes, almacenar, pérdidas de ventas, inventarios en tránsito; así como determinar el tamaño del lote, períodos de surtimiento y cantidades de descuento en el precio de los productos.

Los mecanismos encontrados para la coordinación de inventarios son diversos, y han sido estudiados por un sinnúmero de investigadores que ha desarrollado modelos matemáticos bajo condiciones y supuestos específicos.

Por todo lo anterior, puede asumirse que existe un desafío interesante en la gestión de la cadena de suministro para que se lleve a cabo el más alto nivel de coordinación e

integración de las actividades logísticas, al interior de las unidades de negocios y entre ellas, para alcanzar el mejor desempeño en el manejo y control de inventarios en la cadena entera que minimice el coste total de sistema (Lourenço, 2002).

Una revisión de la literatura disponible sobre las consideraciones hechas por los autores de los modelos relacionados con la coordinación de inventarios se muestra en el Capítulo 3 de este documento.

2.3.3 Modelos de coordinación centralizada y descentralizada cliente-proveedor

Una cadena de suministro integrada verticalmente, que gestiona el sistema de inventarios en su totalidad es ideal, sin embargo, ésta no puede ser posible por diversos motivos. Primero, los actores implicados (por ejemplo, vendedores, detallistas, distribuidores, etc.), pueden pertenecer a entidades diferentes y ser más persistentes en maximizar sus propios beneficios que los de la cadena entera (modelo descentralizado).

Incluso, si la cadena pertenece a una sola entidad corporativa (modelo centralizado), la optimización de los inventarios podría ser algo complicado debido a la estructura de los incentivos en la organización. Por lo anterior, es necesario idear un mecanismo para aumentar la coordinación entre las entidades en la cadena de suministro (cliente-proveedor), no sólo para la entidad que toma la iniciativa, sino también para la cadena del suministro entera (Viswanathan y Piplani, 2001).

En general, los mecanismos de coordinación son negociables entre las partes o implícitamente inducidos por alguna de ellas para influir en el comportamiento de la otra (Toptal, 2003). Según Brun y Portioli (2000), los modelos de coordinación más comunes funcionan bajo esquemas centralizados o descentralizado activados con *mecanismos de coordinación*, implícitos o explícitos³. Para Toptal (2003), los llamados *mecanismos de coordinación* son utilizados para lograr beneficios del tipo centralizado usando modelos descentralizados. Por ejemplo, en la coordinación cliente-proveedor es

³ *Los mecanismos de coordinación implícitos consisten de la definición de un conjunto de reglas sociales que especifican de manera natural los cursos legales de acción para cada uno de los agentes; si alguna restricción del protocolo está correctamente diseñada, la acción permitida a los agentes resulta, por definición, en un comportamiento coherente, incluso sin la comunicación entre ellos. En el caso de la coordinación explícita, abiertamente los agentes discuten sobre quién hace qué, cómo, y cuándo; en consecuencia, los agentes tienen que comunicar sus intenciones, objetivos, resultados y estados de la naturaleza. El esfuerzo requerido para diseñar un conjunto completo de reglas sociales, preferentemente debe buscar ir hacia un esquema explícito: la coordinación es lograda vía la comunicación entre agentes.*

común llevar a cabo descuentos por volumen en el precio de los productos, aplicar promociones, establecer períodos de abasto comunes o una combinación de éstos.

En efecto, la coordinación y cooperación entre múltiples eslabones, bajo sistemas descentralizados de gestión, han ganado mucha atención en años recientes debido al énfasis creciente en la importancia de la gestión de la cadena de suministro entre clientes y proveedores (Verity, 1996).

Toptal (2003) señala que a diferencia de la gestión centralizada, que determina el valor del beneficio máximo esperado entre proveedores y clientes, por medio de la suma directa de sus beneficios individuales ($\pi^c = \pi_V^c + \pi_B^c$) y de sus restricciones técnicas y económicas, la gestión descentralizada es más compleja y el valor de los beneficios (π^d) se obtienen de manera secuencial.

Más específicamente, el cálculo del valor del beneficio dependerá de quién domina el canal; si el cliente establece las condiciones de negociación, alcanzará primero su beneficio particular (π_B^d), y el proveedor lo hará después (π_V^d), y viceversa. Es decir $\pi^d = \pi_B^d + \pi_V^d$. En este contexto Li, *et al.* (1996) señalan que el cliente asume una posición monopolística con respecto al proveedor y podrá determinar el precio de compra, la cantidad a pedir de acuerdo a su tamaño de lote económico, la fecha de suministro, etc.

Por lo anterior, Brun y Portioli (2000) sostienen que los modelos de coordinación centralizados requieren de sólo un sitio para la toma de datos y decisiones; argumentan que la ventaja principal es la posibilidad de alcanzar el óptimo; sin embargo, reconocen que estos modelos dependen de un punto central, y funcionan mal en ambientes dinámicos; los modelos de coordinación descentralizada trabajan cuando los datos y la toma de decisiones son extendidos entre diferentes actores.

Siendo raramente óptimos, dichos modelos son más robustos y aceptan la separación de la información y la autonomía de las decisiones. La alternativa de conservar autonomía en las decisiones impide diseñar un modelo de coordinación centralizado.

Toptal (2003) establece que el modelo centralizado maximiza los beneficios esperados del sistema, y por lo tanto, el valor de su función objetivo puede asumirse como una cota superior sobre los beneficios totales esperados del sistema descentralizado. Es decir $\pi^d \leq \pi^c$.

En este sentido, el modelo centralizado puede ser utilizado como un punto de referencia, y la diferencia entre π^d y π^c puede ser considerada como un elemento para mejorar la solución descentralizada, tal como lo llevan acabo en su investigación Golbasi y Wu (2002). Por lo anterior, Toptal (2003) llega a las siguientes observaciones, por demás interesantes:

- $\pi^d \leq \pi^c$: Los beneficios del modelo descentralizado son inferiores a los del modelo centralizado por lo que respecta a los beneficios del sistema.
- $\pi_B^d \geq \pi_B^c$: Los beneficios esperados del cliente en el modelo descentralizado son más grandes o al menos iguales que aquellos en la solución centralizada.
- $\pi_V^c \geq \pi_V^d$: Los beneficios esperados del proveedor en el modelo centralizado son más grandes o al menos iguales como aquellos del modelo descentralizado.
- $\pi_V^c - \pi_V^d \geq \pi_B^d - \pi_B^c$: El beneficio del proveedor en el modelo centralizado no es menor que las pérdidas del cliente en el modelo descentralizado.

A partir de estas conclusiones, la cuarta observación es la idea clave de la coordinación entre cliente-proveedor (o actores) debido a que ésta sugiere que los beneficios de un actor en el modelo centralizado son más grandes que las perdidas del otro. Así, los beneficios del proveedor, derivados del modelo centralizado, pueden ser utilizados para compensar las pérdidas relativas del cliente bajo este modelo, así como aumentar los beneficios del cliente bajo un modelo descentralizado.

Esto requiere que este último sea coordinado de tal manera que obtenga el mismo resultado para las variables de decisión como el modelo centralizado, y establecer una manera adecuada para compartir los beneficios mutuamente.

En un sistema proveedor–cliente es común que la variable de decisión sea el tamaño de la orden. La teoría en este contexto señala que un proveedor siempre buscará estimular al cliente para que éste aumente el tamaño de su orden (Chang y Hung, 2002),

lo anterior se debe a que el tamaño económico del pedido del cliente en el modelo centralizado será siempre mayor que en el modelo descentralizado, $Q^c \geq Q^d$ (Toptal, 2003).

2.4 Gestión de Inventarios

Un inventario es un recurso inactivo que podría ser utilizado para producir un beneficio, sin embargo, su relevancia estriba en la necesidad de buscar satisfacer una demanda. De hecho, el problema consiste en gestionar o controlar los inventarios, es decir, tener en existencia los materiales, productos, personal, equipo o el dinero, según se trate, de manera tal que se logre un equilibrio entre los costes propios de mantener un inventario y los costes de no poder satisfacer una demanda.

Por dicho motivo, a continuación se hace una síntesis de la problemática de los inventarios y sus costes relevantes; así como del modelo básico de gestión que ha dado origen a un sinnúmero de trabajos que tratan el tema de la gestión de inventarios.

2.4.1 Problemática y relevancia de los inventarios

La gestión de inventario está relacionada con el flujo, dentro y desde la compañía, y con el equilibrio o exceso entre almacenes en un ambiente de incertidumbre (Tersine, 1988). A nivel meramente básico, el inventario es el resultado en el tiempo de la diferencia entre la acumulación de la oferta y la acumulación de la demanda.

Matemáticamente el nivel de inventario puede expresarse de la siguiente manera: sea $I(t)$ el nivel de inventario en la planta en el período t , e $I(t) = 0$ el estado inicial del inventario. Sea $S(0, t]$ la oferta acumulada (flujo de entrada a la planta) en el período t , y $D(0, t]$ la demanda acumulada (flujo que sale de la planta) en el período t (van Ryzin, 2001). Entonces:

$$I(t) = S(0, t] - D(0, t] \quad (2.1)$$

Sin embargo, cuando $I(t) < 0$ implica que $D(0, t] > S(0, t]$ y por lo tanto, existe cierto nivel de escasez.

El planteamiento antes señalado de ninguna manera es deseable: lo ideal sería que $S(0, t] = D(0, t]$. Sin embargo, en la vida real las cosas no son tan simples y esta idea bien puede ser considerada como utópica. Lo verdaderamente relevante cuando se estudia el tema de inventarios, es tratar de encontrar las causas que provocan el desequilibrio entre la oferta y la demanda.

De hecho, el desequilibrio de la oferta y la demanda en muchas ocasiones es deliberado. Por ejemplo, para atender demandas de estación, como es el caso de productos navideños, juguetes infantiles, ropa de invierno; o en situaciones especiales como el caso de los almacenes localizados en las comunidades marginadas con difícil acceso en México; ahí, cada año el nivel de inventario de productos de primera necesidad se magnifica con meses de anticipación a la época de lluvias, lo anterior se debe a que las comunidades quedan incomunicadas, ya sea por la creciente de los ríos que las circundan o por el mal estado de los caminos, haciendo prácticamente imposible el abasto.

Una segunda razón por crear desequilibrio en la oferta y la demanda es para tomar ventaja de los cambios en los costes de materiales o productos, por ejemplo, es muy común que las distribuidoras de cigarro almacenen grandes inventarios de este producto semanas antes de un aumento en el precio. En tal virtud, dichas operaciones de compra parecen estar más orientadas a la planificación de negocios en el futuro que en decisiones operativas normales.

Los desequilibrios de oferta y demanda también ocurren cuando los eslabones de la cadena de suministro están separados en el tiempo y/o la distancia. Por ejemplo, supóngase que se inician operaciones de abastecimiento desde un centro doméstico de distribución a un cliente localizado en un mercado en ultramar, al que se le envían 3,000 unidades de producto por semana por medio de una cadena de transporte (camión-barco portacontenedores-camión) que demora cinco semanas de tiempo total.

En dicho tiempo no sucede mucho en la planta de recibo, al menos no durante las cinco primeras semanas, cuando reciben el producto embarcado en la semana cero. En la semana seis, los socios en ultramar recibirán el producto embarcado en la semana uno; en la séptima semana recibirían el producto embarcado en la semana dos, y así sucesivamente.

En otras palabras, la salida del almacén es la entrada retrasada en la planta cinco semanas antes: $D(0, t] = S(0, t - 5]$. De ahí que $I(t) = S(0, t] - S(0, t - 5]$ represente el inventario durante el transporte, conocido comúnmente como “*inventario en tránsito*”, el cual, simplemente es la cantidad acumulada de productos durante las cinco semanas anteriores. En este caso, debido a que se embarcan exactamente 3,000 unidades por semana, el inventario en tránsito es una constante de 15,000 unidades ($5 \times 3,000$).

Por lo anterior, en una cadena de transporte con una demora de L unidades de tiempo, el inventario en tránsito está dado por:

$$I(t) = S(0, t] - S(0, t - L] \quad (2.2)$$

Desde luego, el transporte no es la única causa de demoras entre dos eslabones en la cadena de suministro. Los tiempos de ciclo de producción, comunicación y lanzamiento del pedido introducen también demoras significativas. En cualquier momento dichas demoras están presentes y pueden ocasionar importantes fluctuaciones en los niveles de inventarios provocando el ya conocido “*efecto látigo*” (*Bull Whip Effect*). Por lo tanto, el estudio del fenómeno de los inventarios, el cual considere ambos aspectos (inventario en planta (almacén) y en transporte) puede considerarse de vital importancia para el establecimiento y elección de la estrategia de coordinación.

2.4.2 Los costes relevantes del inventario

Algunos académicos han señalado que las inversiones en inventarios representan una gran proporción de los bienes de la compañía. De hecho, estiman que la inversión puede llegar a representar entre el 20% y 40% del total (Tersine, 1988, Verwijmeren, *et al*, 1996).

El inventario encapsula el dinero, y una mala gestión del mismo puede afectar el estado financiero de las compañías. Tener demasiado inventario es tan problemático como disponer de poco. Demasiado, implica costes adicionales innecesarios relacionados con el almacenaje, seguros, impuestos y los correspondientes al deterioro u obsolescencia de los artículos que se mantienen en existencia. Dichos costes son crecientes con el aumento del inventario. Sin embargo, existen costes que disminuyen cuando el inventario aumenta, en la literatura normalmente son citados los siguientes

cuatro: *a)* coste de adquisición o de manufactura, *b)* coste por ordenar, *c)* coste de almacenamiento y *d)* coste por faltantes/escasez.

- a) *Coste de adquisición o de manufactura* (en caso de fabricación). Considera coste de mano de obra directa o indirecta, coste de materiales directos o indirectos, gastos generales (se expresa en unidad monetaria por unidad de producto).
- b) *Coste por ordenar*. Costes administrativos y de oficina involucrados en el proceso de una orden de compra, despacho, trámite del pedido, coste de transporte o coste de iniciar una tanda de producción, en caso de fabricación (se expresa en unidad monetaria por orden).
- c) *Coste de almacenamiento*. Dinero inmovilizado en inventario, coste del espacio de almacenamiento, coste de manipulación, coste de seguro, obsolescencia, deterioro de calidad, coste de tener registro de inventario (expresado en unidad monetaria / unidad/unidad de tiempo).
- d) *Coste por faltantes/escasez (Déficit)*. Considera los requerimientos de tiempo extra ocasionado por el déficit, tiempo adicional de oficinas administrativas, coste de apresuramiento, pérdida de reputación, coste especial de manipulación y embarque, pérdida de tiempo de producción y cualquier otro coste atribuible al déficit (expresado en unidad monetaria/unidad-unidad de tiempo). No considera ventas pérdidas porque supone que esto no ocurre, ya que contemplan sólo retrasos en las entregas.

La relación intrínseca de los costes de inventarios tiene diversos planteamientos, por ejemplo: poco inventario puede causar escasez (*stockouts*) e interrupciones en los sistemas de producción. Además, la producción de largo plazo, asociada con un nivel de inventario alto, oculta problemas de producción (por ejemplo: calidad) que puede dañar el desempeño de la compañía a largo plazo (Vergin, 1998). En concreto, el problema de inventario supone la existencia de una relación directa entre los diferentes tipos de costes antes mencionados; por ejemplo, al aumentar el inventario, el tercer tipo de coste crece y el segundo decrece. El inventario óptimo es aquel para el cual la suma de estos costes se hace mínima.

Asimismo, los costes asociados con el retraso o la imposibilidad de satisfacer la demanda, se traducen en pérdida de ventas o incluso de clientes. Los costes de

preparación, procesamiento y realizar una orden de compra (o de producción), o los relacionados con la puesta en marcha para la producción de un lote, crecen para lotes de pequeño tamaño; también, los costes asociados con el ahorro obtenido por descuentos en el precio de compra o por las economías de escala al producir grandes lotes, pueden verse reducidos por un aumento en los costes de almacenamiento.

De acuerdo con Lambert, *et al.* (1998) el objetivo principal de la gestión de inventarios ha sido la de maximizar la rentabilidad de la compañía, minimizando el coste de capital inmovilizado en el inventario y al mismo tiempo satisfacer los requerimientos de servicio al cliente.

Tradicionalmente, una empresa siempre tiene intereses en conflicto: ventas pretende mantener un inventario alto y variado para poder surtir cualquier pedido; compras también busca tener grandes inventarios, al querer aprovechar los descuentos y fluctuaciones decrecientes en los precios; producción quiere programar y realizar grandes volúmenes, buscando reducir los costes unitarios; en cambio, finanzas se interesa por la rentabilidad de la empresa y en el flujo neto de efectivo, por lo que trata de bajar los inventarios; ingeniería tiende a disminuir los inventarios, con objeto de evitar las pérdidas por obsolescencia.

De este modo, lo que debe importar realmente es poder determinar el inventario óptimo de cada artículo, que equilibre los intereses de las partes en conflicto. Por lo tanto, los costes descritos anteriormente dependen de la cantidad adquirida (producida) por orden, de la frecuencia de adquisición (producción), o de ambas variables. En concreto, resolver un problema de inventario, en su enfoque más simple, consiste en definir cuánto y cuándo se debe ordenar.

2.4.3 El modelo básico para la gestión de inventarios

Los costes de inventario son relativamente los más fáciles de identificar y acometer cuando se atienden problemas de la cadena de suministro. Su relación con muchas de las actividades logísticas de la cadena de suministro es muy evidente. La implementación de muchos métodos y técnicas para resolver el problema de inventarios, ha logrado desarrollos importantes a nivel de tecnologías para abordar este tema, sin

embargo, Cardona, *et al.* (2001) argumentan que aún no se recogen los resultados esperados por los expertos.

Los inventarios muchas veces son inevitables. En alguna parte de los eslabones de la cadena de suministro existen, lo que implica que las decisiones sobre su cantidad sean tomadas por algún decisor, cuyo control sobre los procesos que definen el nivel del inventario (demanda y reposición) se encuentra muy limitado (Tomé, 2005).

Según Waters (2001), considerando dichos procesos existen tres decisiones que pueden resumir los grados de libertad del tomador de decisiones: *i)* ¿Qué productos deben ser almacenados?; *ii)* ¿Cuándo lanzar el pedido? y *iii)* ¿Cuánto se debe pedir? Para Hopp (2004), la toma de decisiones sobre el nivel de inventario involucra la necesidad de elegir entre *coste y servicio (tradeoff)*.

En términos del coste, el modelo básico de gestión de inventarios permite evaluar la decisión (*tradeoff*) de frecuencia de pedido y el nivel de inventario. La base técnica establece que una mayor frecuencia de pedido (o producción) de un producto, resulta en un menor nivel de inventario en el sistema. De esta manera, si un producto que experimenta una demanda constante a una tasa de unidades por año D , que es surtida instantáneamente en lotes de tamaño Q , el producto será surtido con una frecuencia $F = D/Q$ veces por año y el nivel de inventario promedio será $Q/2$ (véase figura 2.10).

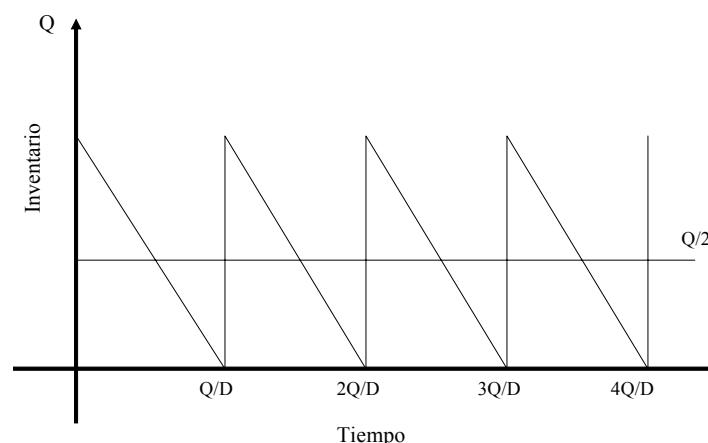


Figura 2.10
Disponibilidad de inventario con demanda constante

Fuente: Hopp (2004).

Ello significa que cada vez que se duplique la frecuencia de pedido (para disminuir Q) se reducirá a la mitad el nivel de inventario. Por lo tanto, la relación entre el nivel de inventario y la frecuencia de pedido mostrará un comportamiento como el que se observa en la figura 2.11.

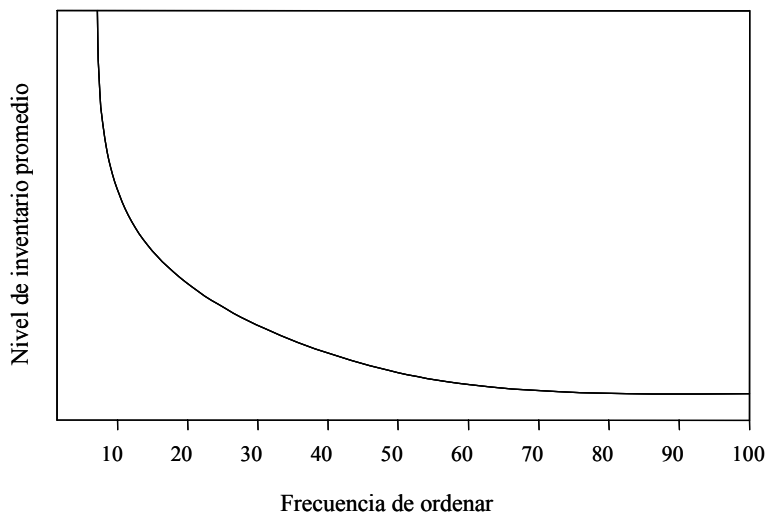


Figura 2.11
Nivel de inventario versus frecuencia de ordenar

Fuente: Hopp (2004).

No obstante lo anterior, a pesar de que el abasto más frecuentemente de un producto tiene un gran impacto en el inventario, se ha demostrado también que los beneficios de esta política de inventario disminuyen rápidamente. Para comparar lo anterior, basta considerar los costes de manutención de inventario y de lanzamiento de ordenes de resurtido, a partir de la relación mostrada en la figura 2.9. Por ejemplo, si h es el coste de mantener una unidad de inventario por año y A el coste por lanzar una orden de surtido, sus costes anuales serán $hQ/2$ y AD/Q , respectivamente.

En términos del valor de Q (la cantidad a pedir), las funciones de coste de manutención y por ordenar acusan un equilibrio económico y minimizan el coste total en el punto donde los costes marginales de manutención son iguales a los costes marginales por ordenar (véase figura 2.10), es decir, $hQ/2 = AD/Q$, lo cual implica que el tamaño del lote se calcule con:

$$Q^* = \sqrt{\frac{2AD}{h}} \quad (2.3)$$

Fórmula muy conocida para calcular la cantidad de pedido económico (*EOQ*: *Economic Order Quantity*, por sus siglas en inglés), que establece las bases para integrar el almacenaje y los costes por ordenar en el momento de determinar el tamaño de los lotes a producir o comprar (¿Cuánto pedir?).

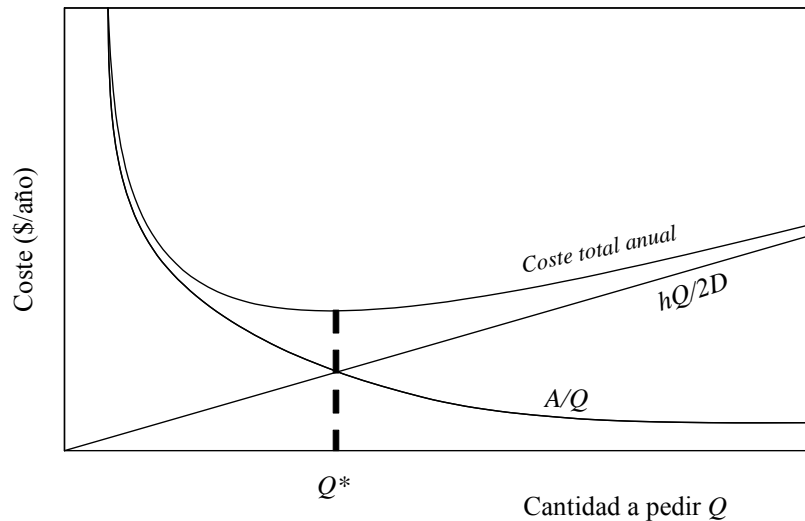


Figura 2.12
Inventario anual y costes por ordenar como una función del tamaño del pedido

Fuente: Hopp (2004).

En el contexto de la gestión de la cadena de suministro los conflictos de intereses entre las actividades logísticas de los diversos eslabones de la cadena se recrudecen, y el nivel de incertidumbre se incrementa sobre los procesos que definen el nivel del inventario (demanda y reposición) haciendo poco práctico el modelo básico. Según Delgado y Marín (2000), a partir de las aportaciones hechas por Harris (1913) del modelo *EOQ* y de Wilson (1934) del sistema de reposición de inventarios mediante “*punto de pedido*” (¿Cuándo pedir?), se desarrollan diferentes variantes en las que se incorporan nuevos condicionantes.

Muchos investigadores han desarrollado modelos matemáticos más sofisticados para la gestión de inventarios, considerando: múltiples variables y parámetros relacionados con la demanda, el número de productos y eslabones; períodos de reaprovisionamiento, constante y dinámico; variación de precios; coordinación entre proveedores y clientes; y últimamente, algunos están considerados aspectos relacionados con la operación del transporte y su influencia en el sistema de inventarios, etc.

2.5 Gestión y operación del transporte

La gestión del transporte es un aspecto que, sin duda, influye de manera significativa en el desempeño empresarial. Para abordar dicha temática, en esta sección primeramente se destaca la importancia del transporte en la cadena de suministro. Después, se describe la trascendencia de su coordinación, atendiendo al contexto internacional en donde se plantea la problemática que atiende esta investigación.

Más tarde, se presentan los factores relevantes del transporte que han sido identificados como los principales elementos para la selección, no sólo del modo de transporte, sino de las rutas multimodales y la combinación idónea de modos (cadenas de transporte). Finalmente, esta sección termina con la descripción de una interesante propuesta elaborada por Bookbinder y Neil (1998) para la evaluación de rutas multimodales de transporte. Dicha propuesta, permite realizar la elección de la ruta más adecuada de acuerdo a un análisis de la tasa de intercambio (*trade off*) entre el coste y tiempo de entrega. Cabe señalar, que esta última temática indicada, representa la parte fundamental que apoya la Tesis que plantea este trabajo de investigación.

2.5.1 Importancia del transporte en la cadena de suministro

Para Linn, *et al.* (2002) la gestión efectiva de la cadena de suministro requiere de la integración de todas sus funciones, tales como: abasto, compras, producción, ventas, finanzas, almacenamiento y transporte. Asimismo, en Jiménez y Hernández (2002) se reconoce que son varios los aspectos que se deben tener en cuenta para optimizar la cadena, entre ellos: *i*) crear relaciones de colaboración entre proveedores y clientes; *ii*) agilizar los procesos en la toma de decisiones; *iii*) fomentar la comunicación, coordinación y colaboración; *iv*) uso adecuado de la tecnología de la información; y *v*) reconocer la importancia del transporte. Sin embargo, se advierte que la mayor parte de los investigadores que han estudiado los procesos en la cadena de suministro, han centrado sus análisis en los primeros cuatro puntos, siempre descuidando el último.

La importancia del transporte en la cadena de suministro reside en dos aspectos primordiales: *i*) se encuentra en todos los eslabones de la cadena (Fair y Williams, 1981), y *ii*) es reconocido como una de las dos actividades con mayor participación en los costes logísticos (junto con la gestión de inventarios) (Tseng, *et al.*, 2005).

Adicionalmente, es imprescindible señalar que a partir de la proliferación de las unidades productivas globales, los sistemas de transporte han alcanzado una mayor importancia y significado, debido al aumento de sus costes de operación derivado de las siguientes tendencias:

- a) Acelerado desarrollo de redes logísticas globales (fragmentación de la producción).
- b) Minimización de inventarios en el canal comercial.
- c) Incremento de la demanda para servicios “*justo a tiempo*”.
- d) Aumento de los requerimientos para mejorar la rentabilidad del servicio de transporte, sobre todo para grandes distancias.
- e) Aumento incesante del precio del combustible.

Lo anterior ha traído consigo que los factores de transporte, tales como: flexibilidad, rapidez y fiabilidad sean mayormente explotados.

Por lo anterior, se debe considerar que el transporte ha dejado de ser una actividad meramente funcional y ha pasado a ser un factor más de la estrategia competitiva de las compañías. Así parece indicar el estudio realizado por Gentry (1995), en donde clientes y proveedores señalaron que los transportistas son entidades importantes para alcanzar numerosas metas operacionales de una relación estratégica de colaboración

En su estudio, Gentry (195) encontró que la mayoría de los entrevistados afirmaron que los transportistas pueden ser un factor "crítico" o "importante" en los siguientes aspectos: *i*) para aumentar las entregas a tiempo (89%); *ii*) apoyar las iniciativas “*justo a tiempo*” (69%); *iii*) disminuir los niveles de inventario (69%); *iv*) acortar el tiempo de ciclo total (69%); *v*) alcanzar metas de servicio a clientes (67%), *vi*) bajar los costes administrativos (54%); *vii*) optimizar el coste total de propiedad (52%); y *viii*) reducir el riesgo a través del valor añadido de los servicios (52%).

De esta manera, puede afirmarse que el estudio y consideración explícita de la operación del transporte, en combinación con otras funciones logísticas, se convierte en un requisito insoslayable en el desarrollo de técnicas modernas o modelos de gestión integrales. Por lo tanto, no debe minimizarse la importancia del transporte en los esquemas de abastecimiento y distribución; la producción misma depende de la salida y

entrada oportuna de materias primas, de piezas y de ensamblajes parciales; la satisfacción del cliente depende de la salida de los productos terminados en los plazos convenidos, por lo tanto, el transporte de abastecimiento y distribución juega un papel preponderante en la cadena de suministro para lograr la correcta disponibilidad de los inventarios (véase figura 2.13).

La figura 2.13, ilustra cómo el desarrollo de esquemas específicos sobre el flujo de la información y las relaciones entre el transporte y los eslabones de la cadena de suministro, permiten estipular a detalle los procesos de entrega y recepción de mercancías, y con ello, el nivel de inventario en cada eslabón. Dichos esquemas contemplan, sobre todo, el diseño de canales muy precisos de comunicación y transmisión de la información, en donde, una mayor integración del transporte en la cadena de suministro le permitiría participar en el diseño logístico de abastecimiento y la distribución de materias primas y productos terminados.

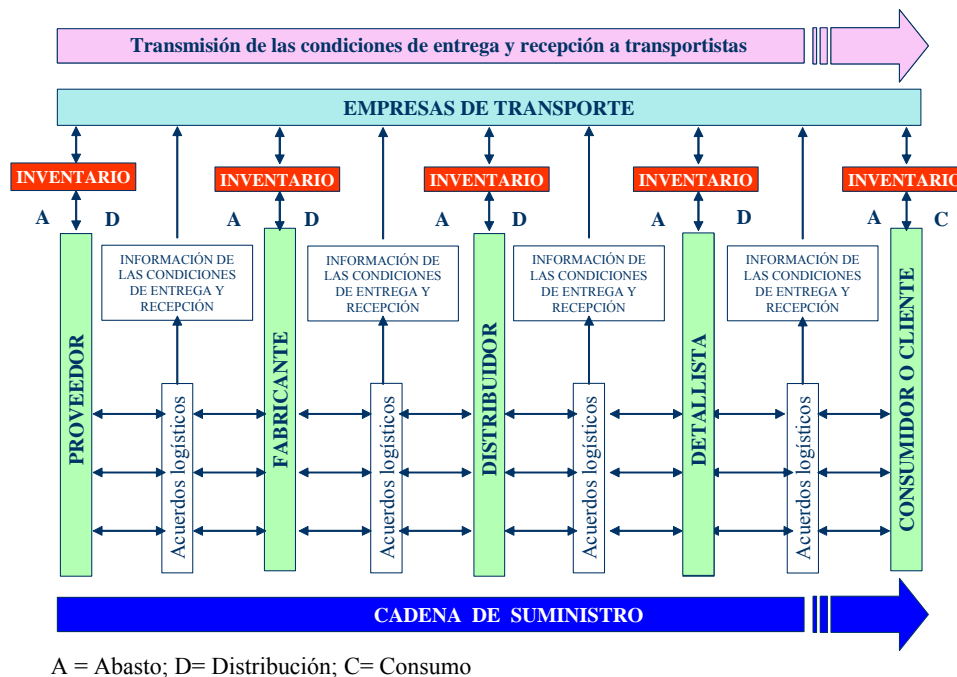


Figura 2.13
Relación del transporte y el inventario en las etapas de abastecimiento y distribución

Fuente: Adaptado de Recomendaciones AECOC para la Logística (RAL). AECOC (Asociación Española de Codificación Comercial).

Es común que el transporte sea considerado como un gasto y pocas veces tratado como un elemento que puede aportar ventajas competitivas. Su función de “arrastrador” de cargas es un calificativo que debe ser superado, pues con una

integración cabal en la cadena de suministro es factible una mayor aportación en la cadena de valor de los usuarios.

En la actualidad, algunas empresas transportistas están ingresando al sistema de certificación de normas de calidad ISO 9000, para que en un ambiente de cadena de suministro puedan ingresar a competir con calidad en su mercado objetivo. Sin embargo, si un fabricante no integra al transporte a sus procesos logísticos, la certificación puede estar seriamente cuestionada, es decir, ¿Realmente la certificación garantiza el adecuado funcionamiento de las actividades de abastecimiento y distribución? o más específicamente, ¿Ello es suficiente para contribuir al mejor control de otras funciones como en el caso de los inventarios?

2.5.2 Transporte combinado y la importancia de su coordinación

La importancia de la coordinación del transporte, está determinada por la necesaria combinación en una especie de cadena de los diferentes modos de transporte para el movimiento de los productos. En el ámbito internacional, un modo de transporte generalmente no opera de manera independiente, y si de manera complementaria. Debido a lo anterior, a nivel mundial se conforman grandes cadenas multimodales de transporte para dar respuesta a los cambios en los requerimientos de la gestión de la cadena de suministro, que se presentan en mercados y sistemas de distribución globales.

El uso combinado para potenciar las ventajas inherentes a los distintos modos de transporte, al menos en México, aparentemente no ha sido del todo explotado, ya sea por la barreras naturales de las diferencias operativas que existe entre ellos, la escasez de planes y programas de apoyo a su expansión por parte de las autoridades, o simplemente por los “*usos y costumbres*” de los expedidores, o ignorancia de éstos sobre las ventajas competitivas de esta modalidad de transporte, denominado “multimodal”.

Capineri y Leinbach (2006), reconocen que de los factores favorables del transporte multimodal, destacan el coste y el aumento de la capacidad para mover grandes volúmenes de carga. Para Lowe (2005), esta modalidad de transporte permite también el uso adecuado de la infraestructura y promueve la distribución equilibrada de

la carga por modo. Impacta en los costes sociales por medio de la reducción de la contaminación, consumo de energía, y aumento de la seguridad.

Sin embargo, el transporte multimodal se convierte en una alternativa real solamente cuando opera con altos niveles de coordinación para reducir los denominados “*costes de fricción*”. Los costes de fricción se definen como el sobre-coste que constituye una medida de ineficiencia en las operaciones que se traducen en precios más elevados, demoras en los plazos de entrega, menos disponibilidad de servicios de calidad, limitaciones del tipo de mercancías, más riesgos de desperfectos, procedimientos administrativos más complejos, entre otros (Banomyong y Beresford, 2001).

Más específicamente, el transporte multimodal supone una reordenación de los recursos de las empresas, en donde el objetivo se traduce a administrar el flujo de mercancías sobre una cadena de transporte, la cual se consolida a partir del resurgimiento de las cadenas de suministro internacionales.

Por fortuna, las condiciones internacionales del mercado actualmente están impulsando de manera “natural” la evolución del sistema de transporte multimodal. Un buen número de servicios han sido el resultado de iniciativas por parte de algunas compañías. Sin embargo, Dewitt y Clinger (2000) señalan que el crecimiento del transporte multimodal obedece a cuatro factores principales:

- a) Medición, entendimiento y respuesta del papel que juega el multimodalismo en los cambios de los requerimientos del cliente y la hipercompetitividad de la cadena de suministro en un mundo global.
- b) Mayor confiabilidad y flexibilidad de respuesta a cambios en los requerimientos del cliente mediante la uniforme e integrada coordinación del flujo de carga través del equipo de diversos modos.
- c) Conocimiento actual y futuro de las opciones operativas y alternativas multimodales, así como el potencial para mejorar las tecnologías de la información y las comunicaciones.
- d) Atención a las restricciones y coordinación de la capacidad de la infraestructura disponible, incluyendo las relacionadas a la política y regulación, así como a una mejor gestión de la infraestructura existente, considerando las futuras inversiones.

Lo anterior ha propiciado, por ejemplo, que el transporte terrestre sea mucho más importante para las líneas navieras de lo que fue en el pasado. Hace veinte años, el tránsito regular de Hong Kong a Nueva York era de 40 días por medio de un servicio totalmente marítimo a través del Canal de Panamá. A finales de los setenta, el transporte multimodal se convirtió en una opción. La carga de Hong Kong era descargada en la costa occidental, y trasladada a Nueva York por ferrocarril durante un tiempo de tránsito de 30 días. En 1984, el desarrollo del servicio integrado de doble plataforma de la costa occidental redujo aún más el tránsito a 24 días. Para 1990, el servicio directo de Hong Kong a la costa occidental y subsecuentes mejoras al sistema intermodal estableció un servicio de 17 días. Se trata de una reducción en el tiempo en tránsito de más del 50% (Prince, 1998). El desarrollo no se debe únicamente a la tecnología intermodal sino, de mayor importancia, a un proceso integrado con mayor énfasis en la coordinación.

Un estudio realizado en Alberta, Canadá, concluye que los principales factores que los expedidores tienen en cuenta para seleccionar un servicio de transporte multimodal, en orden de la importancia otorgada, son: las tarifas o precio de transporte, confiabilidad del servicio, disponibilidad/adecuado equipo de transporte y el tiempo en tránsito (Alberta, 2004).

Los resultados anteriores, parecen confirmar que la mayoría de los usuarios buscan una cadena de transporte económica y confiable para trasladar sus mercancías. La caída constante de las tarifas del transporte, reportadas por Rubin y Tal (2005), permite observar que los usuarios tienen la oportunidad de obtener precios bastante competitivos en la cadena de su elección.

Como resultado de esa situación, parece evidente que elegirán los servicios multimodales que brinden el mejor nivel y que cumpla con su estrategia de suministro. Desde luego, esto último se encuentra muy relacionado con el tiempo en tránsito o la velocidad; para muchos usuarios, este concepto posiblemente les interesará para plantear una reducción de sus costes logísticos por medio de una adecuada elección y combinación de la cadena de transporte para el movimiento de sus productos. Adicionalmente, estarán buscando la completa certidumbre de que las mercancías llegarán a tiempo e intactas.

Desde el punto de vista de la eficiencia en el control de los inventarios, los objetivos del transporte multimodal generalmente están orientados hacia los siguientes dos aspectos fundamentales:

- a) Atender integralmente los pedidos de los clientes asegurando la entrega, cantidad y calidad del producto solicitado.
- b) Combinar los modos de transporte de menor coste de flete (barco, ferrocarril) con los modos de coste más elevado (avión, camión) cuando sea necesario, ya sea para cubrir la demanda programada, retrasos de embarques, pérdidas de embarques, cubrir faltantes, o urgencias, con un enfoque de bajo coste.

2.5.3 Los factores relevantes del transporte multimodal

Para Banomyong y Beresford (2001), la competitividad internacional del comercio ha cambiado enormemente bajo la influencia de varios factores, los cuales aumentan los costes totales de transporte. Entre ellos, los costes asociados en la transferencia física de los bienes, en donde la información se convierte en una pieza esencial en las negociaciones mercantiles del comercio internacional, y en los costes de capital que se incurren durante el desplazamiento de los productos, es decir, el coste del inventario en tránsito. El nivel de incertidumbre en la cuantificación del coste (directo como indirecto) es una cuestión que enfrentan las empresas y que perjudican constantemente a los expedidores. Para estos autores, las consideraciones antes mencionadas, indican que las oportunidades de comercio pueden beneficiarse con servicios de transporte multimodal mejor organizados.

Andersson y Hasson (1996) señalan que los diferentes modos de transporte no son sustitutos perfectos uno del otro, ya que cada uno tiene ventajas distintas sobre otros, según el tipo de carga, la distancia a viajar, la ubicación de la carga ha ser recogida y entregada, el grado de congestionamiento del tráfico, el medio de transporte (agua, tierra o aire), la existencia o carencia de la infraestructura, la calidad de la infraestructura, impuestos y tarifas de cada modo.

La elección del modo de transporte tiene un impacto directo en la eficiencia del sistema de transporte multimodal. Dependiendo de los modos combinados, el desempeño del sistema multimodal se verá afectado. Simples modelos de coste-

distancia entre autotransporte y ferrocarril son comunes en la literatura para movimientos locales. Para viajes largos (internacionales) se modela la relación barco contra avión. De acuerdo con Banomyong y Beresford (2001), existen diversos modelos creados para ayudar al tomador de decisiones a realizar la elección o combinación de los modos de transporte, no sólo para minimizar los costes y los riesgos, sino que satisfaga los requerimientos del nivel de servicio.

Beresford (1999) desarrolló un modelo que considera los costes incurridos por los distintos modos de transporte (autotransporte, ferrocarril, barco y canales de navegación) y en las zonas de transferencia intermodal (puertos, terminales de carga ferroviarias, terminales interiores intermodales). El modelo es desarrollado para el caso de movimientos “*todo superficie*”, es decir, no incluye el movimiento aéreo. Establece cuatro etapas principales. Desde la forma más básica (figura 2.14), pasando por formas intermedias (figuras 2.15 y 2.16), hasta la forma más integral (figura 2.17).

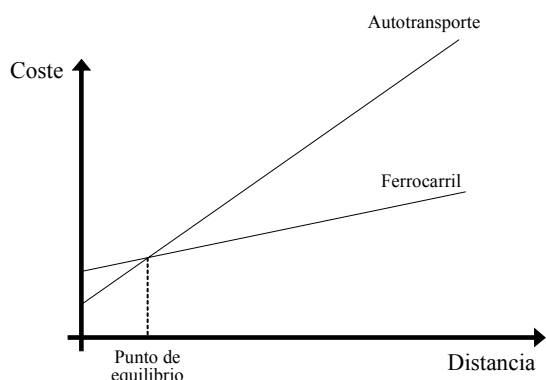


Figura 2.14
Alternativa unimodal

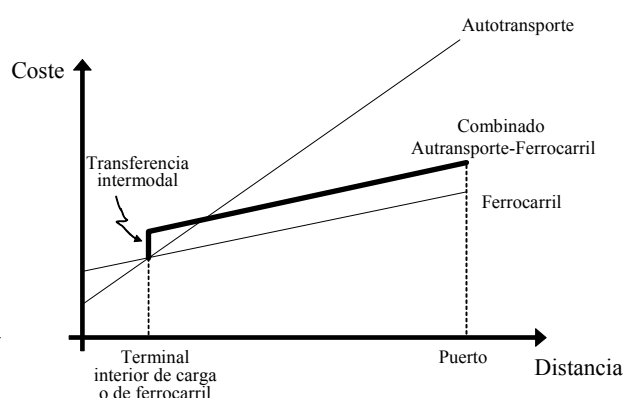


Figura 2.15
Transporte combinado
Autotransporte-Ferrocarril

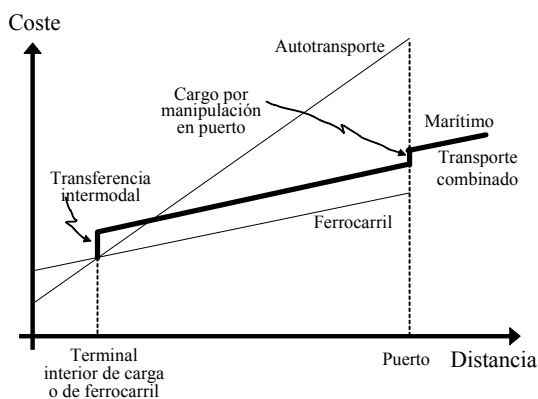


Figura 2.16
Transporte Combinado
Autotransporte-Ferrocarril-Marítimo

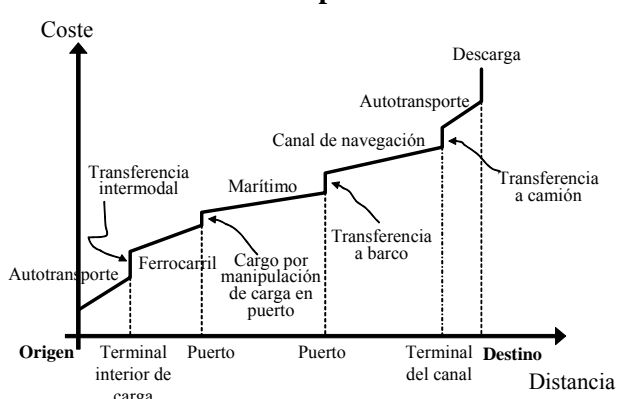


Figura 2.17
Transporte multimodal desde
el origen hasta el destino

Fuente: Beresford (1999).

Cuando diferentes modos son utilizados en el transporte de mercancías, se incurre en un coste por concepto de transferencias. Dicho coste es el pago por transferir la carga de un modo de transporte a otro. La transferencia puede ser relativamente simple, de un tren a un camión.

Alternativamente, la descarga de cajas en un muelle que pueden ser transferidas hasta una terminal aérea, puede ser más compleja. Dichas maniobras son consideradas como los costes de "manipulación" de la carga. Los gastos de transferencia pueden ser establecidos como fijos o variables sobre una unidad fija por unidad de peso, o con base en unidad de volumen. De esta manera, la diferencia en el coste puede estar sujeta a varios factores, tales como: coste de la mano de obra local, o por el tipo de equipo para realizar las maniobras.

La premisa fundamental de este modelo considera que el coste de transporte varía entre los modos. La pendiente de las curvas refleja el valor del coste. Para ciertos volúmenes de carga, se establece que el transporte marítimo es el de menor coste por tonelada por distancia; por su parte, el autotransporte es considerado el más caro, normalmente después de cierta distancia. Por su parte, el transporte por canales y el ferrocarril en cierta forma son considerados como costes intermedios.

En todos los puertos y terminales intermodales interiores de carga es aplicado un pago por el manejo de la carga, sin considerar algún tipo de servicio de valor añadido. En las figuras anteriores, dicho valor está representado por la curva vertical dentro del proceso del movimiento de carga. La altura de la curva vertical es proporcional al nivel del pago (coste). De esta manera, dependiendo de la ruta seleccionada y la combinación de los modos, el coste de transporte es muy diferente. Por todos estos motivos, Beresford (1999) establece que los factores relevantes en el transporte multimodal son:

- a) Coste
- b) Tiempo
- c) Combinación de los modos de transporte
- d) Transferencia multimodal

Otros autores agregan factores tales como: tipo de mercancía y el reparto de la carga por diferentes modalidades de transporte (Bookbinder y Neil, 1998; Ruesch, 2001).

2.5.4 Evaluación y selección de las cadenas multimodales de transporte

Con la apertura y formulación de los acuerdos de libre comercio, muchas empresas ahora tienen la oportunidad de expandir su mercado. Sin embargo, se reconocen dos obstáculos significativos: el primero, es que los envíos de carga o productos involucran varias rutas y modos de transporte que observan diferentes costes; el segundo, está relacionado con las dificultades (por ejemplo, congestión, demoras administrativas, etc.) al cruzar las fronteras (Giermanski, 1998). Para el segundo caso, soluciones puntuales pueden ser implementadas por las instituciones gubernamentales correspondientes; para el primero, una evaluación para la selección del modo de transporte es necesaria. Vale decir que, para tránsitos internacionales, existe evidencia empírica de que el transporte multimodal puede ser más competitivo en comparación con sólo un modo (Shapiro, 2000; Bookbinder y Neil, 1998).

Por ejemplo, utilizando un camión sobre una ruta específica, un fabricante puede enviar un contenedor con carga a la Ciudad de México desde Montreal, Canadá. Si ese mismo contenedor es transportado por otra ruta utilizando al transporte marítimo (camión-barco-camión) como segmento principal, es posible que el coste de esta combinación sea más barato, pero con el inconveniente de llegar dos días después.

Por lo anterior, y desde el punto de vista del expedidor, las decisiones sobre la elección de la ruta y los servicios de transporte a utilizar, demandan soluciones “no dominadas” basadas en los siguientes dos objetivos:

- a) *Maximizar (nivel de servicio) o Minimizar (tiempo en tránsito)*
- b) *Minimizar (coste total)*

Esto es, cada una de las rutas poseen un coste y un nivel de servicio en función del tiempo en tránsito de las mercancías, según el modo o combinación multimodal disponible; por lo tanto, la decisión de elección de alguna alternativa se resuelve a partir de la evaluación previa de los dos criterios anteriores, buscando el mejor nivel de servicio posible y el más bajo coste. En donde, el nivel de servicio representa el “*tiempo en tránsito*” desde el origen hasta el destino, incluyendo el cruce en las fronteras del país y otras demoras. Mientras que el coste, se compone de la suma de los gastos incurridos en todos los segmentos de transporte, más cualquier cargo por maniobras de manipulación y entrega (*coste de transferencia*).

2.5.4.1 Análisis del intercambio (*trade off*) coste-nivel de servicio entre las alternativas de transporte

Una manera de facilitar la toma de decisiones de diversas alternativas de transporte, sobre los criterios de nivel de servicio y coste, puede ser definida con la ayuda de la construcción de una frontera eficiente de soluciones de Óptimo de Pareto para un problema con dos objetivos [*Minimizar(tiempo en tránsito)*, *Minimizar(coste total)*]. En efecto, desde un punto de vista analítico, no es necesario escoger un objetivo sobre el otro. En vez de ello, los modelos de optimización pueden ayudar hacer evaluaciones de los dos objetivos y seleccionar el más conveniente.

En la figura 2.18, las rutas multimodales localizadas sobre la “frontera eficiente” son definidas como soluciones “*no dominadas*”. Una mejora en el nivel de servicio (reducción del tiempo en tránsito), implica un aumento en el coste de transporte, o viceversa. Una ruta que conecta un par Origen y Destino (O-D) es “*no dominada*” con respecto a otra existente, si al menos es mejor en tiempo en tránsito o en coste, y es estrictamente superior en alguno de esos criterios. Una ruta multimodal es “*dominada*” si existe otra ruta (con el mismo par O-D) que la supere en ambos objetivos.

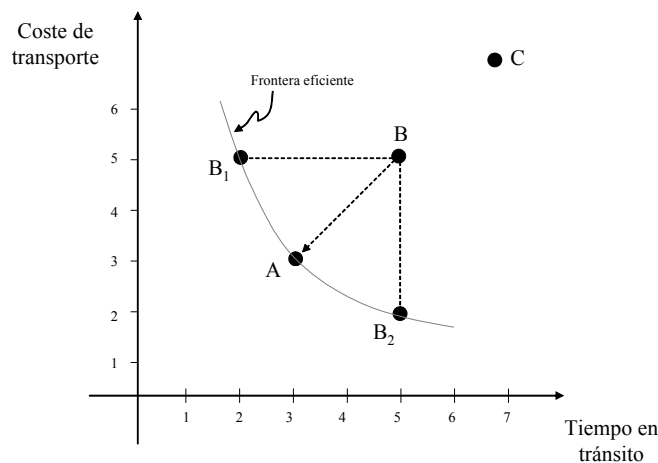


Figura 2.18
Óptimo de Pareto para la elección de rutas multimodales de carga

Fuente: Shapiro (2000).

Dicha figura 2.18 muestra el intercambio (*tradeoff*) entre el coste de transporte y el tiempo en tránsito (medido en días) del proceso de toma de decisiones para seleccionar una ruta de transporte (unimodal o multimodal). Supóngase que la política actual de una empresa establece que el tiempo de entrega (nivel de servicio) es de cinco días y que su coste de transporte corresponde al nivel que señala la alternativa B, misma

que se encuentra fuera de la frontera eficiente. Utilizando un modelo de optimización, la alta dirección tiene la oportunidad de identificar y poner en práctica la ruta B_2 sobre la frontera eficiente, la cual baja el coste de transporte, quizá con la negociación de descuentos por volumen en las tarifas de transporte, pero manteniendo la misma política de servicio al cliente.

Alternativamente, la compañía podría pensar en gastar la misma cantidad en el transporte de sus productos, pero exigir mayor coordinación para mejorar el nivel de servicio (reducir el tiempo en tránsito), con lo cual, se podría ofrecer una mejora del servicio al cliente poniendo en práctica la alternativa B_1 “no dominada”. Otra opción es cambiar de ruta (alternativa A), buscando al mismo tiempo reducir el coste de transporte y mejorar el nivel de servicio para un plazo de entrega hasta de tres días. En contraste, la ruta C es tan distante de la frontera eficiente que son necesarias mejoras significativas para hacer de ella una alternativa viable.

2.5.4.2 Evaluación competitiva de las opciones multimodales de transporte

De acuerdo con la sección anterior, la elección de una ruta de transporte se centra sólo en aquellas alternativas “no dominadas” para cada par origen y destino. Sin embargo, elegir la que proporcione el mayor beneficio no es tan evidente para el caso de un conjunto de alternativas localizadas sobre la frontera eficiente. Por lo tanto, es necesario diseñar un procedimiento de evaluación que permita dilucidar la mejor alternativa (en este caso, una ruta).

Una propuesta de evaluación radica en establecer un parámetro que afecte al tiempo en tránsito, medido a partir del coste de capital de las mercancías durante su transporte.

El mayor tiempo en el movimiento de un producto es cuando éste se encuentra en tránsito. Entre más grande es el tiempo en tránsito, el producto se encuentra indisponible para su consumo, implicando con ello un aumento en los costes de capital, daños a la mercancía, seguros e inventarios de seguridad, es decir, un aumento de los costes de “inventario en tránsito”.

La apropiada evaluación de este factor permite al proveedor y su cliente decidir cuánto reducir el valor del tiempo en tránsito. No obstante la dificultad de medir el

coste del inventario en tránsito, algunos autores asumen que cada contenedor incurre en un cargo de x dólares por día por tiempo en tránsito. Con este elemento, los costes totales de transporte son divididos en dos componentes principales: *i*) el coste de transporte τ ; y *ii*) el coste de inventario en tránsito H . En tal caso, el intercambio entre el coste y el tiempo en tránsito de rutas “no dominadas” de hecho pueden ser ordenadas.

De esta manera, el coste total de transporte $C_T^T = \tau + (t_t \cdot H)$; donde t_t es el tiempo en tránsito asociado a la ruta. Para cada ruta “no dominada” entre un origen y destino específico, la construcción total de las curvas permite determinar el rango H , para la cual la alternativa de transporte ofrece el coste total más bajo (Bookbinder y Neil, 1998).

Para el caso de las tres rutas que se presentan en el cuadro 2.5, para cualquier valor de H , la ruta 2 nunca alcanzará el menor coste total de las tres, y por lo tanto se elimina del análisis; en este caso se logra la situación más simple donde existen dos rutas no dominadas para un par origen-destino en particular. Una es más barata y lenta (ruta 1), la otra es más rápida pero de mayor coste (ruta 2); ante esta disyuntiva, el valor de H en donde es indiferente la elección es de \$311.33 por día por tiempo en tránsito. Para valores de $H < \$311.33$, la elección se inclinara por la ruta 1; por el contrario, la ruta 2 será preferida para valores mayores de H .

Cuadro 2.5
Elección y evaluación de rutas multimodales no dominadas

Ruta	Modos	τ (\$)	t_t (horas)	H (\$/día/t)	C_T^T (\$)
1	Carr-fc-mar-carr	6,269.4	8.5	311.3333	6269.4
2	Carr-fc- fc-carr	6,945.7	8.0		6945.7
3	Carr-mar-carr	6,269.4	5.5		6269.4

Nota: Carr = Carretero; fc.=Ferrocarril; mar = Marítimo.
Fuente: Bookbinder y Neil (1998).

2.6 El transporte en la cadena suministro y su influencia en el sistema de los inventarios

En esta sección se presenta un análisis general del vínculo que existe entre el sistema de inventarios y el transporte. Primordialmente se destaca el efecto de ambos en el sistema de costes. De manera específica, se trata el tamaño del pedido y su impacto en el coste de transporte; este último, considerando restricciones de capacidad y

su impacto en el precio de venta, según los términos del comercio internacional utilizados (*Incoterms*). En la parte final se describe la operatividad de envíos en “*contenedor completo*” (*FCL: Full Container Load*) y “*contenedor consolidado*” (*LCL: Less Container Load*), así como sus implicaciones en los costes de transporte. La sección termina con el análisis de la relación existente entre los modos de transporte y la política de pedido.

2.6.1 El sistema de inventario y su relación con el transporte

La gestión de inventarios es un aspecto crítico de los sistemas de producción y distribución. Un almacenamiento amplio o lento movimiento de los inventarios (y a menudo ambos) son señales claras de una compañía en problemas. Las soluciones con poca visión por corregir estos extremos, ya sea cambiando la frecuencia de la producción o estableciendo programas para atender ordenes de emergencia, a menudo provocan peores resultados.

Para proporcionar el más alto nivel de servicio a los clientes y reducir los costes de operación al más bajo valor, la coordinación de inventarios con otros tópicos, tales como: producción, pedidos, almacenaje y transporte, es muy importante. De manera particular, la relación del transporte con el sistema de inventarios es directa. El grado de influencia sobre el nivel de las existencias radica en la combinación explícita del diseño de la red y la capacidad del transporte (la cual incluye la selección del modo).

Lo deseable es la determinación conjunta de la alternativa de transporte y los parámetros de inventario (por ejemplo: punto de reorden y cantidad a ordenar). La clave es formular el problema de inventario incluyendo de manera explícita las variables fundamentales del transporte. Swensetha y Godfrey (2002) confirman esta posición, y desarrollan un estudio en donde demuestra que una función de las tarifas de transporte puede ser incorporada a las decisiones de resurtido de los inventarios.

Tradicionalmente los modelos de gestión de inventario son utilizados para la determinación del tamaño de lote económico de producción o de pedido, generalmente incluyen los costes que implican la producción, preparación, generación de ordenes y de almacenamiento, considerando de manera implícita los costes de transporte. En efecto, normalmente la política de inventario considera fijos los siguientes parámetros

relevantes del transporte: *i*) coste; *ii*) tiempo promedio de traslado; y *iii*) variabilidad del tiempo de transporte. Evidentemente, las diferencias en el coste de transporte o variabilidad y valor del tiempo de traslado de mercancías, pueden originar diferentes niveles de inventario de seguridad y cantidades a ordenar (Drexl y Kimms, 1997).

Por lo anterior, los costes de transporte implícitos, entraña con frecuencia que el precio de venta de los productos al distribuidor (P_{VV}) enfrente grandes diferencias con respecto al precio de venta del consumidor final (P_{VB}). La razón es obvia, y puede explicarse por los costes que se incurren durante la manipulación y el traslado de los bienes entre los sitios de producción y consumo. En general, después del proceso de elaboración, un artículo es resguardado en un sitio especial para que sea preparado y posteriormente cargado en un vehículo especializado de transporte, para ser enviado a un sitio donde será descargado para su almacenamiento temporal, en espera de su uso para el ensamble o consumo final. Los costes más evidentes relacionados con este conjunto de tareas son los siguientes:

- Preparación y empaque
- Manipulación
- Pérdidas
- Almacenamiento
- Procesamiento de ordenes
- Financieros
- Tarifas, comisiones, u otros pagos oficiales
- Transporte

Daganzo (1996) clasifica estos tipos de costes en dos grandes grupos: *a*) los incurridos en el movimiento, y *b*) los relacionados con la manutención (almacenamiento). Los primeros, representan los costes de transporte dirigidos a superar la distancia, mientras que los segundos, están más relacionados con los costes de inventario orientados al tiempo.

Los costes incurridos por el movimiento, incluye aquellos que tienen que ver con la manipulación de las mercancías y el transporte. Los primeros, relacionados con el tamaño del lote (por ejemplo, manutención, preparación y empaque, maniobras de carga y descarga, etc.), y los segundos, asociados con la distancia (por ejemplo, coste/ton-km).

Por lo que refiere a los costes de manutención, incluyen la “renta” (C_r) de las inversiones y los causados por el tiempo de resguardo de los artículos (C_h). Los costes

de la “renta” implican: el espacio o área destinada al almacenamiento (C_S), las inversiones en maquinaria o equipo empleado para la manipulación (C_{CE}), y el mantenimiento destinado a los dos anteriores (C_M). Los costes por el tiempo de resguardo son significativos para capturar el coste de permanencia de los productos en el almacén (C_{hP}), el cual incluye el coste de oportunidad del capital destinado al almacenamiento (C_{CR}), y el valor perdido durante el resguardo (obsolescencia) (C_o). Así, para un conjunto dado de instalaciones (espacio y equipo), existe una componente fija (C_f) del coste total, y los costes de resguardo (almacenamiento) se conjugan en una componente variable (C_V), que dependen de cómo son procesados los productos, es decir, de la estrategia (E) empleada. Por lo anterior:

$$C_r = C_S + C_{CE} + C_M \Rightarrow C_f \quad (2.4)$$

$$C_h = C_{hP} + C_{CR} + C_o \Rightarrow C_V(E) \quad (2.5)$$

De esta forma, el coste total de mantención de inventarios está compuesto por:

$$C_f + C_V(E) = CT_h \quad (2.6)$$

En especial, el coste por uso de instalaciones y equipo (renta), a diferencia del coste de resguardo por unidad de tiempo, no depende de la cantidad almacenada. Más específicamente, el coste de la renta, está en función del tamaño de las instalaciones necesarias que albergan la máxima acumulación de productos en un momento determinado. Por ello, el diseño de un sistema de manipulación y gestión del inventario (D_S) debe ser proporcional a la máxima acumulación posible ($A_{máx}$), definido por la estrategia o política de inventario (E).

$$D_S \approx A_{máx} \Rightarrow E \quad (2.7)$$

En este sentido, el factor de proporcionalidad dependerá de la cantidad de productos, sus requerimientos de almacenaje, y el predominante coste de la renta por el espacio. Si las instalaciones son propias (no arrendadas), entonces el coste de adquisición debe aumentar linealmente con el tamaño. Luego, se podrá calcular una renta equivalente (basada en la amortización de los costes de inversión sobre la vida útil), la cual debe ser fuertemente proporcional a la máxima acumulación.

En general, los costes de mantenimiento de inventarios han sido ampliamente tratados en la literatura existente y su característica principal es que dependen directamente del volumen de mercancías gestionado; de manera conjunta son combinados con los costes por ordenar o de producción, adquisición y de escasez o rezagos en las entregas, con el propósito de determinar el coste total de un sistema de inventarios.

Contrario a los costes de inventario, el coste de transporte no es directamente proporcional al volumen de mercancías adquiridas, sino que depende del volumen transportado en cada pedido. En efecto, los costes de transporte se miden en función del segmento de carga que se esté moviendo y de las características de una diversidad de elementos operativos (por ejemplo: tipo de mercancía, modo de transporte, clase de vehículo, distancia entre el origen y destino de la carga, flota rentada o propia, infraestructura disponible, etc.).

En la práctica, la combinación de estos elementos operativos del sistema de transporte provoca que en la mayoría de las veces sus costes sean muy difíciles de cuantificar. Por esta razón, en las secciones a continuación se lleva a cabo una presentación general de los componentes del coste de transporte bajo diferentes contextos de gestión, entre los que destaca la participación del transporte en la relación cliente-proveedor.

2.6.2 El inventario y los costes del transporte

En esta sección se hace un breve repaso de las consideraciones más relevantes que involucran los costes de transporte. La idea detrás de los planteamientos vertidos en este apartado, tiene como propósito establecer la base matemática del fenómeno de los costes de transporte y su interacción con el sistema de inventarios en una interrelación cliente-proveedor, cuestión que se lleva a cabo en la primera parte. En la segunda, se analiza la estructura básica de los costes de transporte, la cual da paso a un análisis de la relación de éstos con el tamaño del envío por modo, extendiendo este análisis hacia la consideración de las restricciones de capacidad del equipo de transporte. También, se identifica el impacto del coste del transporte en el precio de venta de los productos en el comercio internacional, de acuerdo al tipo de *Incoterm* empleado. Finalmente, se

presenta una comparativa entre los costes de transporte para el caso de “*contenedor completo*” contra “*contenedor consolidado*” (servicio de consolidación).

2.6.2.1 El tamaño del pedido y su impacto en el coste de transporte

En un esquema básico para el envío de productos entre un origen y un destino, los costes de transporte son determinados prácticamente por un coste fijo que afecta de manera directa los envíos realizados (\$/unidad de carga; por ejemplo: \$/ton) más el coste incurrido por unidad de carga durante el desplazamiento (\$/unidad de carga-unidad de distancia; por ejemplo: \$/ton-km). En efecto, los costes variables son determinados a partir de los gastos incurridos por la operación, representados regularmente por el nivel de consumo de los combustibles y el mantenimiento de la flota vehicular, prorrateados por el volumen de carga transportada entre el origen y el destino de los productos.

La formulación matemática de esta aseveración es muy sencilla y puede iniciarse con establecer lo siguiente. Por cada envío realizado, el coste de transporte está compuesto por un coste fijo (c_f), el cual incluye todos aquellos gastos que se realizan para la administración y explotación del servicio; y de un coste variable (c_v), el cual incluye todos aquellos gastos erogados afectados por el nivel de las operaciones de la empresa. Específicamente, el coste de transporte por unidad de carga entre un par origen y destino está determinado por la siguiente expresión:

$$\text{Coste de transporte} = c_f + c_v \quad (2.8)$$

Cuando se habla del nivel de operaciones se refiere al volumen de carga que se envía de un origen a un destino, es decir, del tamaño del pedido Q . Por lo tanto, el coste de transporte crecerá linealmente de manera rigurosa, es decir:

$$\text{Coste de transporte} (Q) = c_f + c_v \cdot Q \quad (2.9)$$

La expresión anterior permite observar que un aumento gradual del tamaño del envío produce un aumento similar en el coste de transporte. Evidentemente, llegará el momento en que tal incremento rebase la capacidad máxima de transporte (k), haciendo necesario agregar más de un vehículo a fin de satisfacer la demanda, por lo

tanto, la función de costes de transporte $f_t(Q)$ mostrará aumentos súbitos en el coste de transporte por envíos simultáneos derivado del aumento de su tamaño (véase figura 2.19).

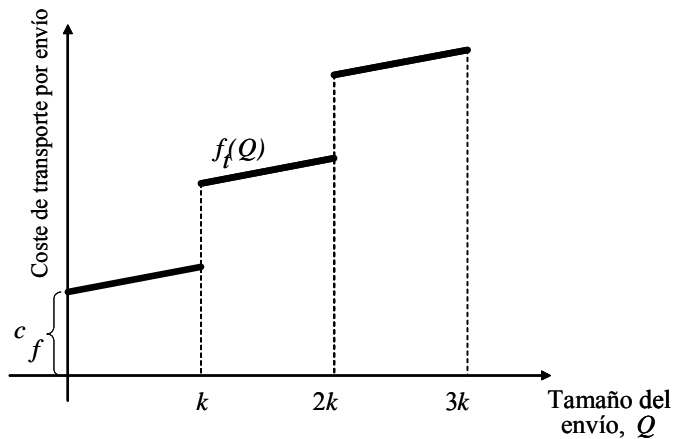


Figura 2.19
Relación del tamaño del envío y su coste de transporte

Fuente: Daganzo (1996).

Por lo anterior, considerando $Q > k$ y que se requiere $Q/k = n$ vehículos simultáneamente, el coste total de transporte c_T^T para n envíos está determinado por la siguiente expresión:

$$c_T^T = \sum_{i=1}^n c_f + c_v Q = n c_f + c_v Q \quad (2.10)$$

Utilizando el teorema de “punto de equilibrio”, la ecuación anterior permite llevar el análisis a dos casos relevantes para el coste: *i*) para cuando el transporte es propio, (recta A) y *ii*) para el caso de transporte rentado (recta B) (véase figura 2.20).

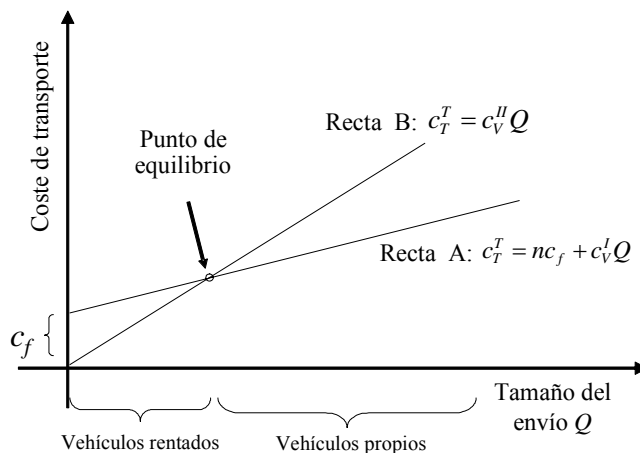


Figura 2.20
Punto de equilibrio de los costes de transporte

Fuente: Islas, *et al.* (2003).

Analizando la alternativa *i*), representada por la recta “A” en la figura 2.20, el coste de transporte parte de un coste inicial c_f , referente por supuesto al coste de inversión en equipo de transporte y a su gestión, con una pendiente que puede ser suave o fuerte, significativa de mantener una tendencia conservadora o un fuerte incremento, respectivamente.

Se asume en ambos casos que la pendiente es constante y que representa los costes de operación que son directamente proporcionales al volumen de las operaciones de la empresa (Islas, *et al*, 2003). Nótese que aquí puede haber importantes efectos de las economías de escala debido a la posibilidad de prorratear los costes fijos, y con ello obtener un coste de transporte por producto (\$/unidad de carga) cada vez menor, aunque parta de un valor muy alto, es decir:

$$\text{Coste de transporte / producto} = c_f \left(\frac{n}{Q} \right) + c_v = c_f \left(\frac{1}{\bar{Q}} \right) + c_v \quad (2.11)$$

Cabe destacar que en esta última expresión, se observa que la única variable de decisión del problema más simple entre un origen y un destino es n (o \bar{Q}), y por lo tanto, es importante señalar que el coste variable (c_v) no debe influir en las decisiones del número de envíos o volúmenes de carga debido a que no es una constante.

En la alternativa *ii*), la del servicio rentado, se tiene también un crecimiento lineal de costes. Sin embargo, el coste promedio parte de cero y es constante dado que es proporcional a la carga movida. Aquí no se observan economías de escala para la empresa que contrata el servicio. El comportamiento puede observarse en la recta “B” de la figura 2.20.

El concepto “punto de equilibrio” implica, en términos generales, que si se tiene una intensidad de movimientos baja (ubicado del lado izquierdo del punto de equilibrio en la gráfica), se obtendría un coste menor si se contratará el servicio de transporte. Por el contrario, si se presenta un intenso movimiento de carga (esquemáticamente ubicado a la derecha del punto de equilibrio), sería más conveniente emplear vehículos propios para la movilización de los productos.

2.6.2.2 Coste de transporte considerando restricciones de capacidad

La relación primaria y directa del sistema de inventario con los costes de transporte, surge de una práctica común de gestión en la que los costes de transporte se incorporan al precio de adquisición. En la mayoría de las negociaciones comerciales el cliente asume los costes de transporte de manera más o menos tácita o implícita en el precio de compra.

A raíz de esta situación, los costes de transporte no son fáciles de identificar y mucho menos de cuantificar. Una manera práctica de lograr lo anterior, puede llevarse a cabo por medio de la tipificación de los esquemas más comunes, mismos que se describen a continuación.

Esquema 1. El proveedor asume de manera explícita los costes de transporte de su propio abasto (C_{RV}) de las cantidades de materia prima (Q_{RV}) y los costes por entregar (C_{EV}) la cantidad de productos terminados (Q_{EV}). El cliente (distribuidor), por su parte, asume sus costes de entrega (C_{EB}) de la cantidad (Q_{EB}) de productos terminados. En este caso, el precio de venta del proveedor (P_{VV}) y el precio de venta del distribuidor (P_{VB}), cada uno con su correspondiente margen (M), son determinados incluyendo el coste de producción (C_{PV}) y de compra (C_{CV}), este último considerando explícitamente el coste de transporte (véase figura 2.21).

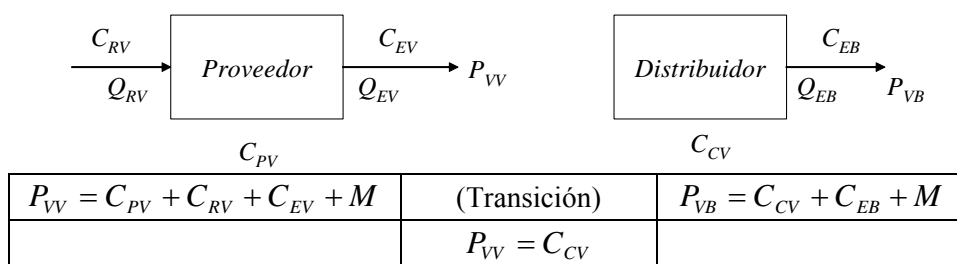


Figura 2.21

Esquema 1. Incorporación del coste de transporte al precio de compra

Esquema 2. El proveedor y cliente (distribuidor) asumen de manera explícita únicamente sus costes de entrega (C_{EV}) y (C_{EB}) de las cantidades (Q_{EV}) y (Q_{EB}) de productos. El precio de venta del proveedor (P_{VV}) y el precio de venta del distribuidor (P_{VB}), cada uno con su correspondiente margen (M), se determinan

asumiendo que los costes de producción (C_{PV}) y de compra (C_{CV}) llevan implícitos los costes de suministro (C_{RV}) y (C_{EV}), los cuales incluyen los costes de transporte (véase figura 2.22).

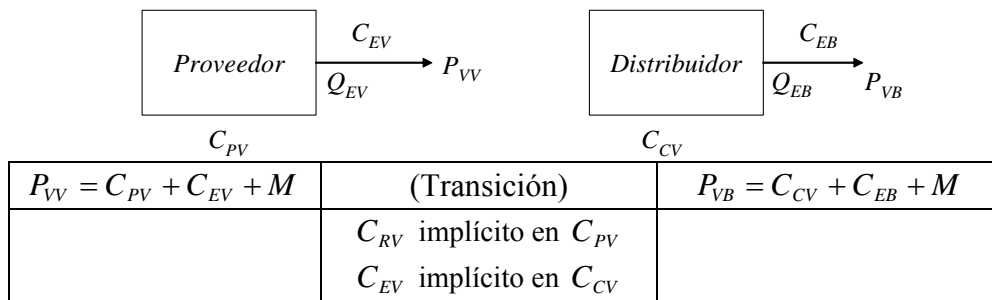


Figura 2.22

Esquema 2. Incorporación del coste de transporte al precio de compra

Esquema 3. El proveedor asume sólo sus costes de abasto (C_{RV}), y el cliente (distribuidor), ambos costes (abasto, C_{RB} y entrega, C_{EB}) para abastecer las cantidades (Q_{RV}) al proveedor, y ($Q_{RB} + Q_{EB}$) para el distribuidor. El precio de venta del proveedor (P_{VV}) y del distribuidor (P_{VB}), con sus respectivos márgenes, consideran de manera explícita el coste de transporte, tal y como puede observarse en el siguiente esquema operativo (figura 2.23).

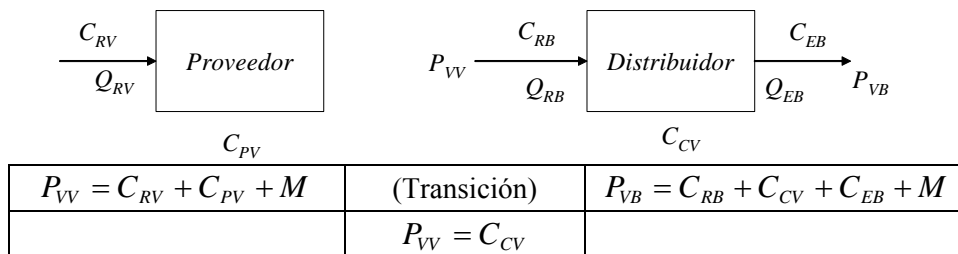


Figura 2.23

Esquema 3. Incorporación del coste de transporte al precio de compra

En la práctica, el esquema más común es que el proveedor que abastece el producto realiza las actividades de suministro, y controla la función de distribución (Esquema 2). Es decir, el proveedor generalmente absorbe los gastos y son cargados al precio final del producto de manera implícita como coste de transporte. La cuestión que aquí se pretende destacar, reside en el hecho de que la gestión del sistema de transporte, por parte del proveedor, es relevante debido a que puede representar un elemento crucial de ventaja o desventaja competitiva.

Por ejemplo, para el caso en que $C_{EV} > C_{RB}$ significa que existe una pésima gestión o planeación del abasto por parte del proveedor, lo que implica un aumento en el

precio de venta de sus productos P_{VV} , mismo que es pagado por el distribuidor (cliente). Por el contrario, con $C_{RB} > C_{EV}$ implica que el distribuidor (cliente) no tiene un adecuado sistema para abastecerse y es mejor dejar al proveedor esta labor.

Evidentemente, este hecho se presenta entre cada eslabón de la cadena de suministro, y el esquema que mejor se adapte al menor coste, siempre será el más recomendable. Por lo tanto, ambos extremos de la cadena, y principalmente el cliente, deberá estar pendiente de los esquemas de distribución y operación que utilizan sus proveedores.

Se dice que los costes operativos de transporte para el abasto y entrega de mercancías son más críticos para el caso de explotar una flota propia que una rentada. El principio básico que sustenta dicho enunciado se basa en la economía de la especialización. Por lo tanto, si se acepta este hecho para el caso de una flota propia, la brecha entre el coste mínimo que podría lograrse y el coste real podría ampliarse aún más. Para el caso de utilizar una flota rentada, generalmente se establece un pago fijo por unidad de peso o contenedor, siendo una manera más fácil de cuantificar los costes de transporte.

Para los efectos del presente trabajo, y reconsiderando nuevamente que el abasto y entrega de mercancías involucran los costes de transporte, compuestos por los dos componentes principales (un coste fijo, incurrido por la estructura administrativa o de gestión y la tenencia del equipo de transporte y un coste variable, incurridos por el volumen de carga movilizada), puede establecerse el siguiente análisis de costes.

Para el caso del Esquema 1 anterior, el proveedor incurre de manera explícita en un coste de transporte $C_{RV}(Q_{RV})$ que involucra una componente fija Cf_V para abastecerse Q_{RV} unidades de productos, generalmente restringido por su capacidad de transporte k (unidades de carga/vehículo), y afectado por el coste por unidad de carga transportada C_V , es decir:

$$C_{RV}(Q_{RV}) = Cf_{RV} + C_V^{RV} \left[\frac{Q_{RV}}{k_1} \right] \quad (2.12)$$

Similarmente, durante la entrega de una cantidad determinada de productos a su cliente, el proveedor incurre en el siguiente coste de transporte:

$$C_{EV}(Q_{EB}) = Cf_{EB} + C_V^{EB} \left[\frac{Q_{EB}}{k_2} \right] \quad (2.13)$$

Donde Q_{EB} denota la cantidad de producto ha entregar al cliente y Cf_{EB} el coste fijo incurrido para hacer llegar las mercancías al cliente. De esta manera, el coste total de transporte para el proveedor CT_{TV} se determina por la siguiente expresión:

$$CT_{TV} = C_{RV}(Q_{RV}) + C_{EV}(Q_{EB}) = Cf_{RV} + C_V^{RV} \left[\frac{Q_{RV}}{k_1} \right] + Cf_{EB} + C_V^{EB} \left[\frac{Q_{EB}}{k_2} \right] \quad (2.14)$$

Sin embargo, asumiendo el uso de la misma estructura organizativa para atender los flujos de aprovisionamiento (abasto) y suministro (entrega), y empleando la misma flota de transporte, los parámetros $k_1 = k_2 = k$ y $C_V^{RV} = C_V^{EV} = C_V$ son los mismos es decir, $Cf_{RV} = Cf_{EB}$, por lo tanto:

$$CT_{TV} = Cf_V + C_V \left[\frac{Q_{RV}}{k} + \frac{Q_{EB}}{k} \right] \quad (2.15)$$

Seguindo la misma estructura de costes, el distribuidor, por entregar productos a su cliente, incurrirá en un coste determinado por:

$$CT_{TB} = C_{EB}(Q_{EB}) = Cf_{EB} + C_V^{EB} \left[\frac{Q_{EB}}{k_{EB}} \right] \quad (2.16)$$

En resumen, el coste total explícito de transporte (CT_{TS}) del sistema proveedor-cliente para el Esquema 1, está determinado por la siguiente expresión:

$$CT_{TS}(Q_{V \rightarrow B}) = \left(Cf_V + C_V \left[\frac{Q_{RV}}{k} + \frac{Q_{EV}}{k} \right] \right) + \left(Cf_{EB} + C_V^{EB} \left[\frac{Q_{EB}}{k_{EB}} \right] \right) \quad (2.17)$$

Similarmente, el coste total explícito de transporte (CT_{TS}) para los Esquemas 2 y 3, está definido por las siguientes dos expresiones, respectivamente:

$$CT_{TS}(Q_{V \rightarrow B}) = \left(Cf_{EV} + C_V^{EV} \left[\frac{Q_{EV}}{k_V} \right] \right) + \left(Cf_{EB} + C_V^{EB} \left[\frac{Q_{EB}}{k_B} \right] \right) \quad (2.18)$$

$$CT_{TS}(Q_{V \rightarrow B}) = \left(Cf_{RV} + C_V^{RV} \left[\frac{Q_{RV}}{k_V} \right] \right) + \left(Cf_B + C_V \left[\frac{Q_{RB}}{k} + \frac{Q_{EB}}{k} \right] \right) \quad (2.19)$$

2.6.2.3 Impacto del coste de transporte en el precio de venta según el tipo de *Incoterm*

Los *Incoterms* (***I*nternational *c*ommerce *t*erms**) conforman un conjunto de reglas internacionales auspiciados por la *International Chamber of Commerce* (ICC) para la interpretación de los términos utilizados en el comercio internacional. Evitan las incertidumbres derivadas de las distintas interpretaciones de tales términos en diferentes países. Operativamente, indican en donde inicia y en dónde termina la responsabilidad del que vende y en dónde empieza la responsabilidad del que compra. Es decir, determinan el punto de transferencia de la responsabilidad de las mercancías en tránsito (ICC, 2006); además, reflejan el estado del arte de las prácticas del transporte internacional.

De acuerdo con la *Commission on Commercial Law and Practice* (CCLP), los *Incoterms* no determinan la propiedad de una mercancía, y que este punto debe ser previsto en otra cláusula en el contrato de venta. Lo que si establecen es el punto exacto en donde el vendedor y comprador asumen los costes (y responsabilidades), entre ellos, los costes de transporte.

El comercio internacional generalmente involucra dos tipos de transporte: doméstico e internacional, cuya combinación forma extensas cadenas de transporte. En el lenguaje operativo de los *Incoterms*, el transporte internacional es reconocido como el “*transporte principal*”. El coste de transporte, ya sea doméstico o internacional, es cubierto por el vendedor o el comprador según el tipo de *Incoterm* acordado. En el cuadro 2.6 se muestra un resumen de los costes principales asociados con el movimiento de las mercancías de exportación/importación, y quién los asume en cada caso.

La operatividad de los *Incoterms* radica en determinar, por parte de los responsables, decisiones sobre la selección del transporte para una orden en particular;

establecer cuándo la propiedad de un envío cambiará de manos del vendedor al comprador, y quién sufragará los gastos del envío.

En especial, destacan las decisiones que tendrán impacto en el precio de las mercancías. En este sentido, el cuadro 2.7 presenta los cargos a las mercancías según el tipo de *Incoterm* utilizado.

Cuadro 2.6
Costes de transporte por tipo de *Incoterm*

Costes	EXW		<i>Incoterms (Grupo F)</i>					
			FCA		FAS		FOB	
	V	C	V	C	V	C	V	C
Maniobras de carga		●	●		●		●	
Transporte doméstico país exportador		●	●		●		●	
Aduana país exportador		●	●		●		●	
Maniobras de descarga/carga		●	●	●	●	●	●	
Transporte principal (internacional)		●		●		●		●
Maniobras de descarga/carga		●		●		●		●
Aduana país importador		●		●		●		●
Transporte doméstico país importador		●		●		●		●
Maniobras de descarga		●		●		●		●

V = Vendedor; C = Comprador; ver el significado de los *Incoterms* en el cuadro 2.7.

Costes	<i>Incoterms (Grupo C)</i>							
	CFR		CIF		CPT		CIP	
	V	C	V	C	V	C	V	C
Maniobras de carga	●		●		●		●	
Transporte doméstico país exportador	●		●		●		●	
Aduana país exportador	●		●		●		●	
Maniobras de descarga/carga	●		●		●		●	
Transporte principal (internacional)	●		●		●		●	
Maniobras de descarga/carga	●	●	●	●	●	●	●	●
Aduana país importador		●		●		●		●
Transporte doméstico país importador		●		●		●		●
Maniobras de descarga		●		●		●		●

Nota: Para estos *Incoterms*, la diferencia reside en quién contrata el transporte y quién paga el seguro.

Costes	<i>Incoterms (Grupo D)</i>									
	DAF		DES		DEQ		DDU		DDP	
	V	C	V	C	V	C	V	C	V	C
Maniobras de carga	●		●		●		●		●	
Transporte doméstico país exportador	●		●		●		●		●	
Aduana país exportador	●		●		●		●		●	
Maniobras de descarga/carga	●		●		●		●		●	
Transporte principal (internacional)	●		●		●		●		●	
Maniobras de descarga/carga	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Aduana país importador		●		●		●		●		●
Transporte doméstico país importador		●		●		●		●		●
Maniobras de descarga		●		●		●		●		●

Fuente: Harter (1990).

Cuadro 2.7
Impacto en el precio de las mercancías por tipo de Incoterm

Descripción		Precio de venta de la mercancía
EXW	Ex Works	No Incluye fletes, seguros, maniobras ni despacho
	En fábrica	
FCA	Free Carrier	Puede o no incluir fletes, seguros, pero incluye maniobras y despacho de exportación
	Libre transportista	
FAS	Free Alongside Ship	Incluye fletes y seguros al costado del buque e incluye despacho de exportación.
	Libre al costado del buque	
FOB	Free On Board	Incluye fletes, seguros, maniobras hasta cruzar maniobras hasta cruzar la borda del buque y despacho de exportación.
	Libre a bordo	
CFR	Cost and Freight	Incluye fletes hasta puerto de destino, maniobras hasta cruzar la borda del buque y despacho de export.
	Coste y flete	
CIF	Cost, Insurance and Freight	Incluye fletes y seguro hasta puerto de destino, maniobras hasta cruzar la borda del buque y despacho de exportación.
	Coste, seguro y flete	
CPT	Carriage Paid To	Incluye fletes hasta punto de destino, maniobras de carga en el lugar convenido y despacho de exportación.
	Porte pagado hasta..	
CIP	Carriage and Insurance Paid To	Incluye fletes y seguros hasta punto de destino, maniobras de carga en el lugar convenido y despacho de export.
	Porte y seguro pagado hasta..	
DAF	Delivered at Frontier	Incluye fletes y seguros hasta frontera de export., maniobras de carga en el lugar convenido y despacho de exportación.
	Entrega en frontera	
DES	Delivered Ex Ship	Incluye fletes, maniobras y seguro hasta puerto de destino, y despacho de export.
	Entrega en buque en puerto de destino	
DEQ	Delivered Ex Quay	Incluye fletes y seguro hasta puerto de destino, maniobras de descarga y despacho de exportación.
	Entrega en muelle de destino con derechos pagados	
DDU	Delivered Duty Unpaid	Incluye fletes y seguro hasta lugar convenido país de destino, y despacho de export.
	Entrega en destino con derecho no pagados	
DDP	Delivered Duty Paid	Incluye fletes y seguro hasta lugar convenido país de destino, despacho de exportación y despacho de importación.
	Entrega en destino con derecho pagados	

Fuente: elaboración propia, con base en Harter (1990).

2.6.2.4 Envíos en “*contenedor completo*” (FCL) contra “*contenedor consolidado*” (LCL) y sus implicaciones en los costes de transporte

En la actualidad, los expedidores de mercancías tienen una mayor variedad de servicios de transporte para realizar sus envíos sobre redes globales a cualquier parte del mundo, caracterizadas por la efectividad en el manejo de la carga. Las facilidades existentes, sobre todo para aquellas pequeñas y medianas empresas que generan bajos volúmenes de carga, han permitido mejores esquemas de operación del transporte que complementan a las grandes compañías que producen mayores volúmenes de carga. En efecto, contar con altos volúmenes de carga pueden realizarse envíos en “*contenedor completo*” (FCL, *Full container Load*), lo cual permite a los transportistas ofrecer bajos costes y un mejor servicio, resultando un ahorro en tiempo y dinero. Para el caso de volúmenes de carga reducidos por parte de los expedidores, los sistemas de consolidación o “*contenedor consolidado*” (LCL, *Less Container Load*) son los mecanismos más eficientes que permiten reducir los costes.

En la práctica, el coste F por unidad de carga (por ejemplo, tonelada) para el caso FCL siempre es menor que el coste c_L por unidad de carga del sistema LCL, el cual varía por el tipo de carga, peso y/o volumen ($k \text{ m}^3$) que se utiliza del contenedor, es decir: $F < kc_L$. En parte, esta última expresión se debe a que en un sistema de consolidación, el coste de transporte se incrementa porque incluye el coste de la recolección de carga que se realiza con vehículos generalmente pequeños.

Por lo antes comentado, el establecer ¿Cuál es el volumen de carga suficiente o más conveniente para que el expedidor minimice sus costes de envío?, se convierte en el cuestionamiento principal entre estas dos variantes de servicio. El planteamiento más común para descifrar dicho cuestionamiento está dado por el ratio F/c_L , la cual permite estimar el tamaño de los envíos (punto de inflexión), desde el punto de vista del expedidor, considerando las tarifas que anteponga el transportista. El comportamiento general de este ratio es igual a uno hasta cierto volumen de carga, a partir del cual surgen economías de escala que sugieren la negociación de tarifas bajo el esquema FCL (en el ejemplo de la figura 2.24, $F/c_L = 1.0$ hasta 14 toneladas).

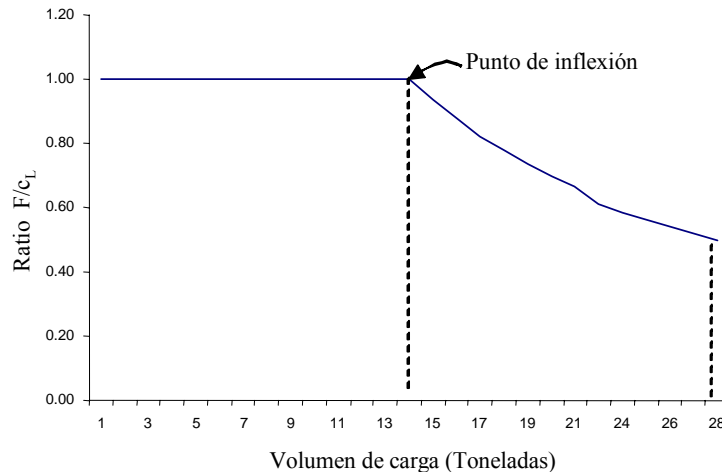


Figura 2.24
Punto de inflexión del ratio de los costes FCL y LCL

Fuente: adaptado de van Eijs (1994).

A manera de comentarios:

1. Un esquema de “*contenedor completo*” (FCL) exige un mínimo de carga para garantizar economías de escala y menores tiempos de espera.

2. El envío de productos por medio de contenedor completo implica un coste por contenedor sin importar prácticamente el tipo o mezcla de productos que se muevan.
3. El esquema de “*contenedor consolidado*” (LCL), implica consolidar cargas impactando directamente de manera negativa en el tiempo de espera y de recorrido de las mercancías.
4. Desde el punto de vista del transportista, cuando su servicio es pagado por unidad de carga (por ejemplo, tonelada movilizada), en un esquema de “*contenedor consolidado*”, el punto de inflexión en la figura 2.25 representa el volumen mínimo de carga que le garantiza cubrir sus costes operativos y obtener una ganancia mínima.
5. Debido a que $F < kc_L$ la diferencia entre $F - c_L$ siempre observará un valor negativo de magnitud τ^- . Sin embargo, una mejora en la coordinación del sistema de consolidación y de transporte, permite una reducción de los costes $-\Delta c_L$ y por lo tanto un decremento de la diferencia con respecto a F , es decir, $F - \Delta c_L = -\Delta\tau^-$ buscando en la medida de las posibilidades alcanzar un valor cercano a cero (véase figura 2.25).

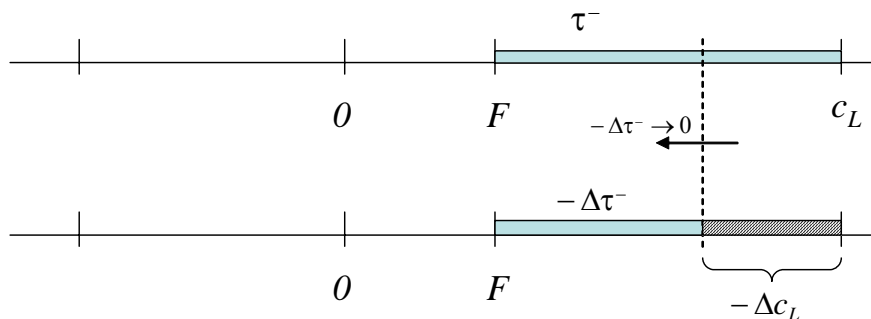


Figura 2.25
Efecto en el coste de transporte por una mejora en el sistema de consolidación de carga

2.6.2.5 Relación del modo de transporte y la política de pedido

Como ya se ha venido mencionado, aproximadamente el coste de transporte por envío crece linealmente con su tamaño, por lo tanto, grandes variaciones pueden ser motivo suficiente para pensar en cambiar de modo de transporte. Daganzo (1996) afirma que algunos modos de transporte pueden mostrar bajo coste por envío y un alto coste por producto, otros pueden ser lo opuesto.

La elección del modo de transporte que permita reducir el coste de los envíos, precisamente dependerá en gran medida de los volúmenes de carga que se estén manejando, es decir, de la política de inventario. Así, la figura 2.26 muestra tres curvas que representan los costes de transporte por envío como una función de su tamaño. Nótese que el mejor modo depende del tamaño del pedido; conforme éste crece, se tiende a favorecer a los modos con más bajos costes variables y altos costes fijos.

Si el embarcador opera su propia flota, las curvas de la figura 2.26 podrían representar diferentes tipos de vehículos e indicar el más económico para un particular tamaño de envío. Sin embargo, en este caso no es tan flexible la elección del vehículo como en el transporte rentado, debido a que los embarcadores no podrían cambiar frecuentemente su flota, y por lo tanto, deberán utilizar la curva más apropiada para evaluar sus costes de transporte. Es de destacar, que la envolvente formada por las curvas de costes evidencia incrementos súbitos en el coste de transporte por envío (Daganzo, 1996).

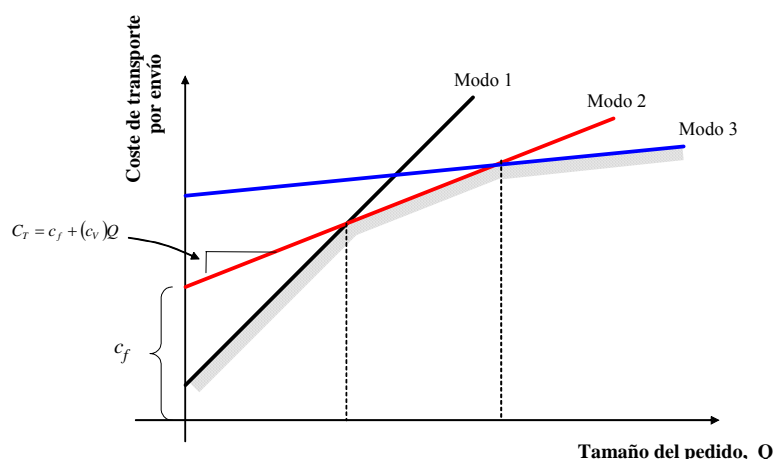


Figura 2.26
Relación entre el tamaño del pedido y su coste por diferentes modos de transporte

Fuente: Daganzo (1996).

Adicionalmente a lo anterior, es común que la comparación de los diferentes modos de transporte incluya el coste del inventario en tránsito ($t_i H$). La razón principal se debe a que su elección está muy relacionada con las bondades del nivel de servicio que brinda cada modo de transporte, en donde, la velocidad de entrega (tiempo en tránsito) de los productos, junto con el coste de transporte, suelen ser los atributos

más importantes que favorecen la elección del modo de acuerdo con los volúmenes de carga.

Sin embargo, dado el coste en tránsito de las mercancías, en general, los modos más rápidos son favorecidos para mover productos más valiosos. Así, a los modos más lentos se asignan mayores volúmenes de carga de menor densidad económica, propiciando un coste de inventario en tránsito más grande, pero con el menor coste por unidad movilizada. En contraparte, los modos más rápidos suelen presentar tarifas más altas por unidad de carga transportada con costes de inventario en tránsito menores, para bajos volúmenes de carga (véase figura 2.27).

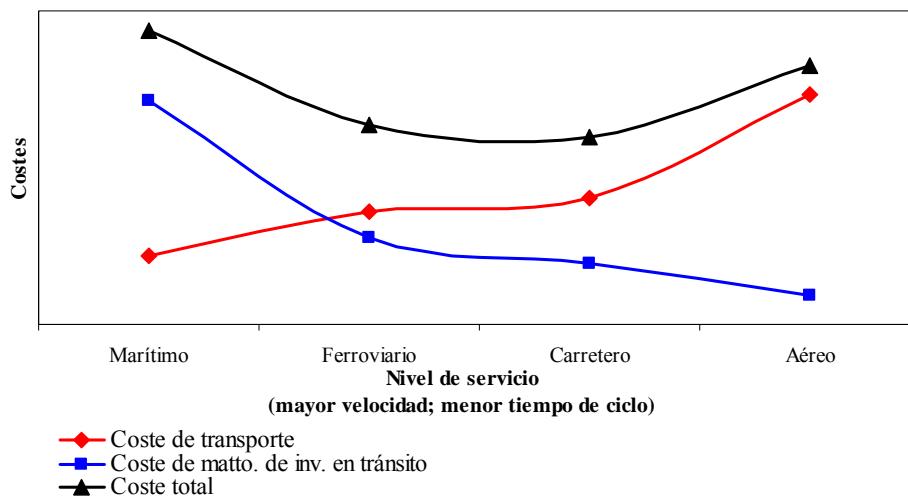


Figura 2.27
Costes totales de transporte y de inventario en tránsito

2.7 Conclusiones

En este capítulo se establece la evidencia empírica que existe sobre el tema de la coordinación de las actividades logísticas, en el contexto general de la cadena de suministro. El marco teórico presentado aquí, refleja plenamente la relevancia de este paradigma y sienta las bases para motivar su estudio, y sobre todo, su aplicación. Gran parte de la literatura disponible que trata el tema de la coordinación de la cadena de suministro, establece las condiciones técnicas para lograr una mayor eficiencia y eficacia en las empresas. En general, se busca que las dependencias e interdependencias organizacionales, pactadas y no pactadas, se conviertan en esquemas operativos confiables y rentables.

No obstante lo anterior, se debe reconocer que algunas empresas no podrán alcanzar ventajas competitivas duraderas en una relación comercial, si el grado de fricción en el proceso de negociación es muy alto. Por tal motivo, un esquema de coordinación e integración empresarial les será muy difícil de instrumentar, impidiéndoles a su vez, descubrir aquellos elementos clave en dicho proceso.

Teniendo en cuenta que la filosofía de la cadena de suministro moderna se basa en la existencia de objetivos alineados, estrategias y esquemas de colaboración entre las empresas, la coordinación y la integración empresarial se convierten en mecanismos aislados con la ausencia de alguno de los principios señalados.

En el contexto de la presente tesis, la coordinación e integración empresarial en una cadena de suministro puede lograrse por medio del establecimiento de objetivos alineados entre las empresas que persigan, por ejemplo, la reducción del coste total en la gestión de los inventarios, maximizar el nivel servicio en el abasto de los productos, reducir el tiempo de ciclo en las entrega, reducir los costes de distribución, entre otros. Para lograr lo anterior, es indispensable diseñar una estrategia de abasto como las planteadas en la sección 2.2.7, y por supuesto, desarrollar relaciones de colaboración que permitan el intercambio de datos e información relevante para la toma de decisiones, en el marco de la cooperación empresarial y con un alto nivel de confianza y comunicación.

Acudiendo a estos principios básicos, todo tipo de empresa, grandes o pequeñas, podrán lograr grandes beneficios a través de la coordinación de sus actividades logísticas e integrar sus procesos de negocios. La gestión de la cadena de suministro, no solamente está orientada a los grandes grupos comerciales e industriales (Wall Mart, Dell, GM, etc.), sino también, todas las pequeñas y medianas empresas (localizadas comúnmente en los últimos eslabones de la cadena) tienen la oportunidad de ser más eficientes por medio de la instrumentación de técnicas y modelos avanzados para la coordinación y la integración empresarial. Específicamente, el tema de la coordinación en la cadena de suministro, desarrollado en este capítulo, está orientado a estudiar el contexto de la gestión de los inventarios y el abasto de productos entre proveedores y clientes, buscando en el fondo, minimizar los costes de su gestión logística y mejorar el nivel de servicio del proceso de abasto.

En términos generales, se ha detectado que los costes logísticos de las empresas representan alrededor del 12% de sus costes totales, y se reconoce también que las actividades logísticas de transporte y manutención de inventarios, constituyen los principales costes logísticos. La importancia inherente de estos dos tópicos en el sector industrial, es relevante para todas las empresas, y buscan constantemente soluciones para su control.

Los planteamientos expuestos en este capítulo, brindan una evidencia clara de que la gestión de inventarios no es un tema pasado de moda, o un tema que haya sido analizado en todas sus vertientes; el solo hecho de saber que continuamente se plantean nuevas estrategias de gestión, permite deducir que el tema esta vigente. En efecto, como puede observarse en la sección 2.2.7, las recientes estrategias de coordinación analizadas ofrecen un panorama general de los esquemas más modernos de gestión de inventarios. Su enfoque basado en la coordinación de inventarios entre clientes y proveedores, obedece a las exigencias competitivas que impone la administración de la cadena de suministro actual.

Por otro lado, la idea de tratar conjuntamente los aspectos de la gestión de inventarios y la operación del transporte, pretende allanar el camino hacia la confirmación de la tesis que sustenta este trabajo. Así, el marco teórico de los conceptos vertidos y analizados, dan cuenta conceptual de la relación intrínseca que existe entre ambas actividades logísticas.

Todas las directrices observadas en la gestión estratégica de los inventarios, permiten observar una tendencia muy marcada hacia la conformación de nuevos y modernos esquemas de coordinación de los procesos y las actividades logísticas de suministro. Es por lo tanto, necesario el desarrollo de modelos complementarios que permitan evaluar las virtudes y consecuencias de las estrategias instrumentadas. En general, es importante modelar la toma de decisiones sobre el tamaño del lote a producir y abastecer, el período de abastecimiento, seleccionar el tipo de transporte y definir las cantidades de producto por modo, establecer el nivel de servicio al cliente. En un esquema del comercio internacional, un modelo puede ayudar a determinar el tipo de negociación más conveniente.

En el siguiente capítulo se presenta el Estado del Arte de los modelos que tratan el tema motivo de esta investigación. El objetivo es conocer los enfoques más relevantes en la literatura científica e identificar las vertientes de estudio que son factibles de abordar.

Referencias

1. (Akkermans, *et al*, 1999) Akkermans, Henk, Bogerd, Paul y Vos, Bart (1999). "Virtuous and Vicious Cycles on the Road Towards International Supply Chain Management". *International Journal Operations & Productions Management*; vol. 19. num. 56 pp 565-581,
2. (Alasoini, *et al*, 2001) Alasoini, Tuomo, Dhondt, Steven, Oehlke, Paul, Roma, Giuseppe, Rua, Aura, y De Sá. Ayres (2001). "Challenges of Work Organization Development in the Knowledge-Based Economy". Presented to DG Employment & Social Affairs By The European Work Organization Network EWON Prepared & Edited by Tuomo Alasoini Contributors. September.
3. (Alberta, 2004) Alberta Transportation (2004). "Alberta Containerized Intermodal Freight Analysis (Exploratory Study)". GTS Group-International. Página web: <http://www.tu.gov.ab.ca/Content/doctype56/production/ContainerStudy.pdf>.
4. (Andersson y Hasson, 1996) Andersson, Thomas & Hasson, Patrick (1998) "Why Integrated Transport Systems?". *OECD Observer*, num. 211, April/May 1998, pp.27-30.
5. (Baldwin y Philippe, 1999) Baldwin, Richard y Philippe, Martin (1999). "Two Waves of Globalization: Superficial Similarities, Fundamentals Differences". Working Paper N° 6904; Cambridge, Massachusetts, Oficina Nacional de Investigaciones Económicas (NBER).
6. (Banerjee, 1986) Banerjee, A. (1986). "A Joint Economic Lot Size Model for Purchaser and Vendor". *Decision Sciences*; vol. 17, pp 292-311.
7. (Banomyong y Beresford, 2001) Banomyong, Ruth y Beresford, Anthony K.C. (2001). "Multimodal Transport: the case of Laotian Garment Exporters". *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*; vol. 31, num. 9.
8. (Barratt y Oliveira, 2001) Barratt, Mark y Oliveira, Alexander (2001). "Supply Chain Collaboration: Exploring the Early Initiatives". Part one. *Supply Chain Practice*; vol. 3, num. 4.
9. (Bartmess y Cerny, 1992) Bartmess A., Cerny K., (1992). "Seeding Plants for a Global Harvesting". *The McKinsey Quarterly Journal*, vol. 2, pp.107-132.
10. (Beresford, 1999) Beresford, A.K.C. (1999). "Modelling Freight Transport Costs: A Case Study of the UK-Greece Corridors". *International Journal of Logistics: Research and Applications*; vol. 2, num. 3, pp. 229-246.
11. (Bookbinder y Neil, 1998) Bookbinder y Neil (1998). "Intermodal Routing of Canada-México Shipments Under NAFTA". Pergamon; Elsevier Science, Ltd; vol. 34, num. 4, pp. 289-303.
12. (Bowersox, 1990) Bowersox, D. J. (1990). "The Strategic Benefits of Logistics Alliances". *Harvard Business Review*; vol. 68, num. 4, pp. 36-45.
13. (Bowersox, *et al*, 2002) Bowersox, D.J., Closs, D.J., y Cooper, B.M. (2002). "Supply Chain Logistics Management". Burr Ridge, Boston: McGraw Hill.
14. (Brewer, *et al*, 2001) Brewer, Ann; M. Button; Kenneth J, y Hensher, David A. (2001). "Handbook of Logistics Supply Chain Management: Handbook in Transport 2". Pergamon.
15. (Browning, 2004) Browning, Beau. (2004). "Collaborative Transportation Management". Logility Inc. White paper. Página web: <http://www.idii.com/wp/ctm.pdf>
16. (Brun y Portioli, 2000) Brun, Alessandro y Portioli-Staudacher, Alberto (2000). "Negotiation-Driven Supply Chain Co-Ordination for Small and Medium Enterprises". Proceedings of the ECAI 2000 Workshop 13 en "Agent Technologies and Their Application Scenarios in Logistics", edited by I. J. Timm, *et al*.

17. (Burgess, *et al*, 2001) Burgess, Incola, George, Tracey y Lowson, Robert (2001). "A Taxonomy of Operational Strategies and their Application in Fast Moving Consumer Goods Sectors". Strategic Operations Management Centre School of Management, University of East Anglia Norwich, NR4 7TJ United Kingdom). Manufacturing Information Systems Proceedings of The Fourth SMESME International Conference.
18. (Cachon, 1999) Cachon, G. (1999). "Competitive Supply Chain Management," Chapter 5 in Tayur, S, R. Ganeshan and M. Magazine (ed.), Quantitative Models for Supply Chain Management, Kluwer, Boston.
19. (Capineri y Leinbach, 2006) Capineri, Cristina y Leinbach, Thomas R (2006). "Freight Transport, Seamlessness, and Competitive Advantage in the Global Economy". European Journal of Transport and Infrastructure Research (EJTIR); vol. 6, num. 1, pp. 23-38.
20. (Caputo, *et al*, 1996) Caputo M., Minnino V., Rescinti R., (1996). "Integrazione Logistica, Interna e Verticale nella Distribuzione di Beni di Largo Consumo". Economia e Management, vol. 1.
21. (Cardona, *et al*, 2001) Cardona, H. C. David; Cataño P. J. Eduardo; Correa E. Alexander; y Peña Z. G. Elena (2001). "Análisis de un sistema de inventarios en una PYME de confección". II Encuentro Colombiano de Dinámica de Sistemas.
22. (Cavalieri, *et al*, 2001) Cavalieri, Sergio, Cesarotti, Vittorio, Gras, Simona, y Spandri, Anna (2001) "Coordinated Planning Models for Managing Spare Parts Inventory in After Sales Service". Work Paper. Dipartimento di Ingegneria, Università di Bergamo, Viale G. Marconi, Dalmine (BG), Italy.
23. (Çetinkaya y Yee, 2000) Çetinkaya, Sila y Yee, Cheng (2000). "Stock Replenishment and Shipment Scheduling for Vendor-Managed Inventory Systems". Management Science © 2000 INFORMS; vol. 46, num. 2, pp. 217-232, February.
24. (Chan y Kingsman, 2005) Chan, Chi Kin y Kingsman, Brian G. (2005). "Coordination in a Single-Vendor Multi-Buyer Supply Chain by Synchronizing Delivery and Production Cycles". Transportation Research Part E (en proceso de su publicación, aceptado el 12 de julio 2005).
25. (Chen, *et al*, 2000) Chen, F., Drezner, Z., Ryan, J. K., y Simchi-Levi, D. (2000). "Quantifying the Bullwhip Effect in a Simple Supply Chain: The Impact of Forecasting, Lead Times, and Information". Management Science; vol. 46, num.3, pp. 436-443.
26. (Chopra y Meindl, 2001) Chopra y Meindl (2001) "Supply Chain Management: Strategy, Planning and Operation". Prentice Hall. Upper Saddle River, New Jersey.
27. (Christopher y Towill, 2001) Christopher, Martin y Towill, Denis R (2001). "Developing Market Specific Supply Chain Strategies". Work Paper, CHRISAPP.MC.
28. (Christopher, 1992) Christopher, Martin (1992). "Logistics and Supply Chain Management: Strategies for Reducing Costs and Improving Service". Pitman, London.
29. (Christopher, 1998) Christopher, Martin (1998). "VMI: Very Mixed Impact?". Logistics Management Distribution Report; vol. 37, num. 12, pp. 51, December, 31.
30. (Christopher, 1998a) Christopher, Martin, (1998a). "Relationships and Alliances: Embracing the Era Network Competition". Estrategia Supply Chain Management; ed. John Gattorna, Gower Press.
31. (Christopher, 1998b) Christopher, Martin, (1998b). "Logistics and Supply Chain Management. Strategies for Reducing Cost and Improving Service". London: Financial Times & Pitman Publishing.
32. (Clark, *et al*, 2001) Clark, T. H., Croson, D. C., y Schiano, W. T. (2001). "A Hierarchical Model of Supply-Chain Integration: Information Sharing and Operational Interdependence in the US Grocery Channel". Information Technology and Management; vol. 2, num .3, pp. 261-288.
33. (Cooke, 2000) Cooke J.A., (2000). "Bringing Carriers into the loop". Logistic Management and Distribution Report, September 1st.
34. (Copacino, 1993) Copacino, W.C. (1993). "Logistics Strategy: How to Get With the Program". Traffic Management; vol. 32, num. 8, pp 23 -24.
35. (Cozzi, 1998) Cozzi M., (1998). "SCM Strategies: A New Conceptual Framework". Master Thesis, Politecnico di Milano, Italy.

36. (Daganzo, 1996) Daganzo, Carlos F. (1996). "Logistics Systems Analysis". Springer. 2^a Edition.
37. (De Toni y Nassimbeni, 1997) De Toni A., y Nassimbeni G., (1997). "The Buyer-Supplier Exchange in The Presence of Design, Logistic and Quality Interactions: Results of an Empirical Research"; 6th. annual IPSERA conference, Ischia, March 24th-26th.
38. (Delgado y Marín, 2000) Delgado, Joaquín y Marín, Fernando (2000). "Evolución en los sistemas de gestión empresarial. Del MRP al ERP". *Economía Industrial*; No. 331/2000/I.
39. (Dewitt y Clinger, 2000) Dewitt, William y Clinger, Jennifer (2000). "Intermodal Freight Transportation". A1B05: TRB, Committee on Intermodal Freight Transport Chairman: Gerhardt Muller, U.S. Merchant Marine Academy.
40. (Digitala, 2005) Digitala (2005). "CPFR (Collaborative Planning, Forecasting and Replenishment)". Página web: <http://www.empresadigitala.net>. Ficha 3.15.
41. (Dong y Xu, 2002) Dong, Yan y Xu, Kefeg (2002). "A Supply Chain Model of Vendor Managed Inventory". *Transportation Research Part E*; vol. 38, pp. 75-95.
42. (Dong, *et al*, 2001) Dong, Yan, Dressner, M. y Shankar, V. (2001). "The Impact of Efficient Replenishment and Continuous Replenishment on Supply Chain Outcomes". Documento de trabajo, Disponible en: <http://bmg2-notes.umd.edu/Faculty/KM/papers.nsf/6de61a84f4107c9d852567f2006c7c0e/cf6fb3d37c2a411a85256b640054613f?OpenDocument>.
43. (Drexl y Kimms, 1997) Drexl A y Kimms A (1997). "Lot sizing and scheduling - Survey and extensions". *European Journal of Operational Research* 99, pp 221-235.
44. (Esper y Williams, 2003) Esper, Terry y Williams, Lisa R. (2003). "The Value of Collaborative Transportation Management (CTM): Its Relationships to CPFR and Information Technology". *Transportation Journal*; vol. 42; num. 4. pp. 55-65.
45. (Eugeni, 1992) Eugeni, S. Joan (1992). "Comentarios a la división espacial del trabajo y de la producción" *Scripta Vetera*, Reproducido de Minus. No. 1, p. 9-25; Versión ampliada (Original: 07-1991). Página web: <http://www.ub.es/geocrit/sv-28.htm>.
46. (Fagel, 1996)) Fagel, A. J. (1996). "Selling on Consignment: Another Tool in the Credit Arsenal". *Business Credit*; vol 98, num. 9, pp. 6-8.
47. (Fair y Williams, 1981) Fair, M. L. y Williams, E. W. (1981). "Transportation and Logistics". Business Publication Inc. USA.
48. (Fawcett y Magnan, 2001) Fawcett, Stanley E. y Gregory M. Magnan (2001). "Achieving World-Class Supply Chain Alignment: Benefits, Barriers, and Bridges". Center for Advanced Purchasing Studies (CAPS); Arizona State University Research Park.
49. (Feenstra y Gordon, 2001) Feenstra, Robert C. y Gordon H. Hanson (2001). "Global Production Sharing and Rising Inequality: A Survey of Trade and Wages". Working Paper, N° 8372, Cambridge, Massachusetts, Oficina Nacional de Investigaciones Económicas (NBER). Página web: <http://www.nber.org/papers/w8372>.
50. (Feenstra, 1998) Feenstra, R. C. (1998): "Integration of Trade and Disintegration of Production in the Global Economy". *Journal of Economic Perspectives*; vol. 12, num. 4, pp. 31-50.
51. (Ferrozzi, *et al*, 1993) Ferrozzi C., Hammond J., y Shapiro R.D., (1993). "Logistica e strategia due". UTET Libreria.
52. (Fisher, 1997) Fisher, M. L. (1997). "What is the Right Supply Chain for your Product?" *Harvard Business Review*; vol. 75, Mar-April, 105-116.
53. (Gallardo, 1996) Gallardo, Velásquez, Anahi (1996). "Innovación tecnológica y nuevas formas de organización". Conferencia dictada por Mariella Berra, investigadora de la Universidad de Turín Italia. Editada en *Gestión y Estrategia*. Edición Internet. Página web: <http://www.azc.uam.mx/publicaciones/gestion/num9/doc8.htm>.
54. (Ganeshan y Harrison, 1995) Ganeshan, Ram y Harrison, Terry. P. (1995). "An Introduction to Supply Chain Management". Department of Management Science and Information Systems, Penn Estate University, USA. Página web: http://lcm.csa.iisc.ernet.in/scm/supply_chain_intro.html.

55. (Gentry, 1995) Gentry, Julie (1995). "Role of Carriers in Buyer/Supplier Strategic Alliances". Center for Advanced Purchasing Studies-CAPS.
56. (Giermanski, 1998) Giermanski, J. (1998). "NAFTA, Border Crossing and the FNM". Telephone interview (April 7) by the present authors with JG, Director of Center for Study of W. Hemispheric Trade, Texas A & M Intl. U. Laredo TX. USA.
57. (Giménez, 2000) Giménez T. Cristina (2000). "Grado de desarrollo de la gestión de la cadena de suministros y sus relaciones de colaboración en el sector de distribución español". Universidad de Barcelona. Documento de trabajo.
58. (GMA, 2002) GMA (2002). "CPFR Baseline Study —Manufacturer Profile". KJR Consulting for the Collaborative Planning, Forecasting & Replenishment Task Force Logistics. Committee Grocery Manufacturers of America (GMA).
59. (Golbasi y Wu, 2002) Golbasi, Hakan y Wu, S. David (2002). "Lead-Time Coordination Between Marketing and Operations in an Internal Market" Manufacturing Logistics Institute, Department of Industrial and Systems Engineering, P.C. Rossin College of Engineering, Lehigh University.
60. (González, 2000) González, J (2000). "Aprovisionamiento *just in time* en la industria del automóvil: el reto de los proveedores de primer rango". Dirección y Organización; vol 24, pp 51-60.
61. (Goyal, 1976) Goyal, S. K. (1976). "An Integrated Inventory Model for a Single Supplier-Single Customer Problem". International Journal of Production Research; vol. 15, num. 1, pp. 107-111.
62. (Greco, 1997) Greco, J. (1997). "Outsourcing: The New Partnership". Journal of Business Strategy; vol. 18, pp. 48-54.
63. (Gutman, 1997) Gutman N., (1997). "Vendor Management Inventory". APICS, January.
64. (Håkansson y Persson, 2004) Håkansson, Håkan y Persson, Göran (2004). "Supply Chain Management: The Logic of Supply Chains and Networks". The Internacional Journal of Logistics Management. vol 15, number 1.
65. (Hall y Braithwaite, 2001) Hall, Darren y Braithwaite, Alan (2001). "The Development of Thinking in Supply Chain and Logistics Management". En Handbook in Transport 2. Chapter 6, Handbook of Logistics and Supply Chain Management. Eds: Brewer, Ann, Button, Kenneth y Hensher, David, PERGAMON, pp. 81-97.
66. (Harmon, 1992) Harmon, Roy L. (1992). "Reinventing the Factory II". The Free Press, 1992, ISBN 0-92-913862-0.
67. (Harris y Swatman, 1997) Harris, John K. y Swatman, Paula M. C. (1997). "Efficient Consumer Response (ECR): a Survey of the Australian Grocery Industry". ACIS'97 — 8th Australasian Conference on Information Systems, Adelaida; pp. 137-148, September.
68. (Harris, 1913) Harris, F.W. (1913). "How Many Parts to Make at Once?" Factory: The Magazine of Management; vol. 10, num. 2, pp. 135-136.
69. (Harter, 1990) Harter, Jhon (1990). "El lenguaje del comercio". Glosario de términos de uso frecuente del Sistema Comercial Internacional. Servicio Informativo y Cultural de los Estados Unidos (versión en español).
70. (Hausman, 2003) Hausman, Warren H. (2003). "Supplier Managed Availability" Supply Chain Online. Página web: <http://www.supplychainonline.com>.
71. (Hayashi y Herman, 2002) Hayashi, Naoki y Herman, George (2002). "A Coordination-Theory Approach to Exploring Process Alternatives for Designing Differentiated Products". Center for Coordination Science, MIT Sloan School of Management.
72. (Hewitt, 1994) Hewitt, F. (1994). "Supply Chain Redesign". The International Journal of Logistics Management; vol. 5, num. 2, p. 9.
73. (Holmstrom, *et al*, 2002) Holmstrom, J., Kary, Fraumling, Riikka, K., y Juha, S. (2002). "Collaborative Planning Forecasting and Replenishment: New Solutions Needed for Mass Collaboration". Supply Chain Management: An International Journal, vol 7, num 3, pp. 136-145.
74. (Hopp, 2004) Hopp, Wallace J. (2004). "Supply Chain Science". En impresión: McGraw-Hill, N.Y, USA. <http://users.iems.nwu.edu/~hopp/book/Supply%20Chain%20Science.pdf>.

75. (ICC, 2006) International Chamber of Commerce (ICC). Commission on Commercial Law and Practice (CLP). Página web: <http://www.incoterms.org>.
76. (Isaac, 1985) Isaac G.A., (1985). "Creating Competitive Advantage through Implementing Just-in-Time Logistic Strategies". Touch Ross Series.
77. (Islas, *et al*, 2003) Islas, V, Jiménez, E. y Vázquez, F. (2003). "Tercerización del transporte en el contexto de la cadena de suministro". Instituto Mexicano del Transporte, Publicación Técnica No. 223.
78. (James, *et al*, 1997) James R., Rich N., Francis M., (1997). "VMI: a Processual Approach". 6th annual IPSERA conference, Ischia, March 24th-26th.
79. (Jiménez y Hernández, 2002) Jiménez S. J. Elías y Hernández, Salvador (2002). "Marco conceptual de la cadena de suministro: un nuevo enfoque logístico". Instituto Mexicano del Transporte; Publicación Técnica No. 215. ISSN 0188-7297; Querétaro, México.
80. (Jiménez, 2004) Jiménez, Elías (2004). "Los factores críticos de éxito de la cadena de suministro". Instituto Mexicano del Transporte; Publicación Técnica núm. 237, ISSN 0188-7297; Querétaro, México.
81. (Johnson, 1999) Johnson Matt, (1999). "Collaboration Data Modeling: CPFR Implementation Guidelines". Council of Logistics Management, annual conference proceedings.
82. (Johnson, 2002) Johnson, Matt (2002) "Efficient Replenishment Management Aligning Roles and Responsibilities in the Contract Manufacturing Supply Chain". Chief Technology Officer, Syncra Systems, Inc. <http://supplychain.ittoolbox.com/pub/BH082002a.pdf>.
83. (Jones y Kierzkowski, 1996) Jones, R.W. y H. Kierzkowski (1996). "Globalization and the Consequences of Internacional Fragmentation". Mimeo.
84. (Kanter, 1994) Kanter, R. M. (1994). "Collaborative Advantage: the Art of Alliances". Harvard Business Review; vol. 72, num. 4, pp. 96-112.
85. (Karolefski, 2001) Karolefski, J. (2001). "Collaborating Across the Supply Chain". Collaboration in Practice: A Supplement to Food Logistics and Retailtech magazines: 24-34.
86. (Kjenstad, 1998) Kjenstad, Dan (1998). "Coordinated Supply Chain Sheduling". Dr. Ing. Thesis/Ph.D. Dissertation. Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Department of Production and Quality Engineering (IPK), Oslo.
87. (Krause, 1998) Krause F.-L., (1998). "Prozessketten für die Virtuelle Produktentwicklung in verteilter Umgebung"; VDI-Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb, Informationsverarbeitung in der Konstruktion '98, VDI Berichte Nr. 1435, VDI Verlag, Düsseldorf.
88. (Kurt Salmon Associates, 1993) Kurt Salmon Associates (1993). "Efficient consumer response: Evaluating consumer value in the grocery industry". Food Marketing Institute, Washington DC.
89. (Lambert y Stock, 1998) Lambert, D. M. y Stock, J. R. (1998). "Fundamentals of Logistics Management". New York: Irwin-McGraw Hill, 611 p.
90. (Lambert, *et al*, 1998) Lambert, D. M., Stock, J. R., y Ellram, L. M. (1998). "Fundamentals of logistics management: abridged edition". New York, McGraw-Hill.
91. (Lario y Pérez, 2001) Lario, E. Francisco y Pérez, P. David (2001). "Introducción a la Gestión de la Cadena de Suministro". Cuadernos de Gestión de la Cadena de Suministro: Una aproximación a la gestión de la cadena de suministro; Centro de Investigación de Gestión e Ingeniería de Producción (CIGIP-UPV); vol. 1; Ref. 2001:2399.
92. (Lario, *et al*, 1999) Lario Esteban F.C., Ortiz Bas A., y Poler Escoto R (1999). "La Gestión de la Cadena de Suministro en el Contexto de la Integración Empresarial". Grupo de Gestión e Ingeniería de Producción (GIP). Departamento de Organización de Empresas. Universidad Politécnica de Valencia.
93. (Lazarcic y Marengo, 1997) Lazarcic N., y Marengo L., (1997). "Towards a Characterization of Assets and Knowledge Created in Technological Agreements: Some Evidence from the Automobile-Robotics Sector"; DRUID, working paper No. 97-8.

94. (Lee y Billington, 1992) Lee, Hau L. y Billington, Corey (1992). "Managing Supply Chain Inventory: Pitfalls and Opportunities". MIT Sloan Management Review; Spring; vol. 33, num. 3; pp.65-75, ABI/INFORM Global.
95. (Lee y Whang, 1998) Lee, H. y Whang, S. (1998). "Information Sharing in a Supply Chain". Research Paper no. 1549, Graduate School of Business, Stanford University.
96. (Lee, *et al*, 1997a) Lee, H. L., Padmanabhan, V., y Whang, S. (1997a). "The Bullwhip Effects in Supply Chains". Sloan Management Review; vol. 38, num. 3, pp. 93-102.
97. (Lee, *et al*, 1997b) Lee, H. L., Padmanabhan, V., y Whang, S. (1997b), "Information Distortion in a Supply Chain: the Bullwhip Effect". Management Science; vol. 43, num. 4, pp. 546-558.
98. (Leiva, 2004) Leiva, Juan (2004) "Estrategia para la integración de la cadena de abastecimiento, basada en las tecnologías de la información y las comunicaciones". Departamento de Informática, Universidad Técnica Federico Santa María, Chile.
99. (Levi, 2003) Levi, Merir H. (2003). "The Business Process (Quiet) Revolution. Transformation to Process Organization". Interfacing Technologies Corporation, Canda.
100. (Li, *et al*, 1996) Li, Susan X. Huang, Zhimin y Asheley, Allan (1996). "Improving Buyer-Seller System Cooperation through Inventory Control". ELSEVIER; International Journal Production Economics; vol. 43, pp. 37-46.
101. (Linn, *et al*, 2002) Linn, Richard J; Chen, Chin-Sheng y Lozan, Jorge A. (2002). "Development ff Distributed Simulation Model for the Transporter Entity in a Supply Chain Process". Department of Industrial and Systems Engineering, Florida International University, Miami. Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference; E. Yücesan, C.-H. Chen, J. L. Snowdon, and J. M. Charnes, Eds.
102. (Lourenço, 2002) Lourenço, Helena R. (2002). "Supply Chain Management: An Opportunity for Metaheuristics". Grupo de Recerca en Logistica Empresarial DEE, Universitat Pompeu Fabra R. Trias Fargas 25-27 08005 Barcelona, Spain.
103. (Lowe, 2005) Lowe, David (2005). "Intermodal Freight Transport". Butterworth-Heinemann, Inc. ISBN: 0750659351.
104. (Lowe y Wrigley 1996) Wrigley, N. y Lowe, M. (1996). "Retailing, Consumption and Capital: Towards the New Retail Geography". Addison-Wesley Longman: London & New York.
105. (Lowson, *et al*, 1999) Lowson, Robert, King, Russell, y Hunter, Alan (1999). "Quick Response: Managing the Supply Chain to Meet Consumer Demand". John Wiley & Sons, Inc. ISBN: 0-471-98833-2; p. 304, September.
106. (Lynch, 2001) Lynch, Kevin (2001). "Collaborative Logistics Networks -Breaking Traditional Performance Barriers for Shippers and Carriers". Nistevo Corporation. Página web: http://www.idii.com/wp/col_logistics.pdf.
107. (Maggiore y Dominioni, 1999) Maggiore E., y Dominioni G., (1999). "Bianco, nero e grigio. Questi i colori del codesign, Sistemi e Impresa"; vol. 4, pp. 39-45.
108. (Magretta, 1998) Magretta J., (1998). "The Power of Virtual Integration: An Interview with Dell Computer's Michael Dell". Harvard Business Review, Mar-Apr, 73-84.
109. (Malone y Crowston, 1993) Malone, T. y Crowston, K. (1993). "The Interdisciplinary Study of Coordination". MIT Sloan Technical Report/Working Paper, November.
110. (Manuali, 1997) Manuali A., (1997). "La qualità negli approvvigionamenti". Logistica e Management; vol. 81.
111. (Marien, 2001) Marien E.J., (2001). "Demand Planning and Sales Forecast: a Supply Chain Essential" in Woods J.A. and Marien E.J. "The Supply Chain Yearbook", McGraw-Hill.
112. (Mark y Alexander, 2001) Mark, B. y Alexander, O. (2001). "Exploring the Experiences of Collaborative Planning Initiatives". International Journal of Physical Distribution & Logistics Management; vol. 31, num .4, pp.266-289.

113. (Martínez, 2001) Martínez, F. Salustiano (2001). "Aproximación teórica a los acuerdos de cooperación empresarial". Documento de trabajo – Trabajo de Investigación. Programa de Doctorado "Administración y Dirección de Empresas". Departamentos de Organización de Empresas y Economía de las Empresa. Universidad de Cádiz, España.
114. (McKinney y Clark 1995) McKinney, J. L. y T. H. Clark (1995). "Procter and Gamble: Improving Consumer Value through Process Redesign" Harvard Business School Case.
115. (Meersman y Voorde, 2001) Meersman Hilde y van de Voorde, Eddy (2001). "International Logistics: a Continuous Search for Competitiveness". En Handbook in Transport 2. Chapter 6, Handbook of Logistics and Supply Chain Management. Eds: Brewer, Ann, Button, Kenneth y Hensher, David, PERGAMON, pp. 61-77.
116. (Mejías y Prado,, 2001) Mejías, A. y Prado, C. (2001). "Logística eficiente en el sector de bienes de gran consumo alimentarios: estudio empírico en Galicia". Revista CEPADE, Artículo 27. E.T.S. Ingenieros Industriales Universidad de Vigo. Página web: <http://www.cepade.es/Ademas/revista29/art7.pdf#search=%22Reaprovisionamiento%20eficiente%20Ana%20Mej%20C3%ADas%22>.
117. (Melachrinoudis, *et al*, 2003) Melachrinoudis, E., Messac, A., y Min, H., "Reconfiguring a Distribution Network: A Physical Programming Approach," Multidisciplinary Design and Optimization Laboratory (MDOL). International Journal of Production Economics (In Press). Página web: <http://www.rpi.edu/~messac/Publications/messac-manny-hokey-ijpe-press.pdf>.
118. (Merrilees y Seretny, 2000) Merrilees, Bill, y Seretny, Marek (2000). "Strategic Marketing by Change Agents in Poland: The Case of Domestic Marketing Consulting Firms". En Haley, George T. (Ed.) "Marketing Intelligence and Planning". Strategic Marketing in Emerging Markets; vol. 18, Issue 5, pp. 247-255.
119. (Min y Zhou, 2002) Min, Hokey y Zhou, Gengui, (2002). "Supply Chain Modeling: Past, Present and Future". Computers & Industrial Engineering; vol. 43, pp. 231-249.
120. (Mishra, 2004) Mishra, Ajay K. (2004). "Selective Discount for Supplier–Buyer Coordination Using Common Replenishment Epochs". European Journal of Operational Research 153; pp. 751–756.
121. (Monahan, 1984) Monahan, J. P. (1984). "A Quantity Discount Pricing Model to Increase Vendor's Profits", Management Science; vol. 30, pp. 720-726.
122. (Monden, 1994) Monden, Y (1994). "Toyota Production System: An Integrated Approach". Chapman and Hall.
123. (Muckstadt, *et al*, 2001) Musckstadt, John; Murray, David; Rappold, James y Colins, Dwigth (2001). "Guidelines for Collaborative Supply Chain System Design and Operations". School Operations Research and Industrial Engineering; Collage of Engineering Cornell University Ithaca, NY. Technical Report No. 1286.
124. (Mula , 2004) Mula, B. Josefa (2004). "Modelos para la planificación de la producción bajo incertidumbre. Aplicación a una empresa del sector del automóvil". Tesis Doctoral Universidad Politécnica de Valencia, España. Vol I. Departamento de Organización de Empresas, Economía Financiera y Contabilidad.
125. (Nagarajan, *et al*, 2000) Nagarajan, Rajaram, Larry Whitman, S. y Hossein Cheraghi (2000). "Enterprise Integration". Proceedings of The 4th Annual International Conference on Industrial Engineering Theory, Applications and Practice November 17-20, San Antonio, Texas, USA.
126. (Nakamura, *et al*, 1998) Nakamura, Masao, Sadao Sakakibara, y Roger Schroeder (1998). "Adoption of Just-in-Time Manufacturing Methods at U.S.- and Japanese-Owned Plants: Some Empirical Evidence". IEEE, Transactions on Engineering Management; vol. 45, num. 3, pp. 230-240, August, 1998.
127. (Novack, *et al*, 1993) Novack R.A., Fawcett S.A., y Reinhardt L.M., (1993). "Rethinking Integrated Concept Foundations: a JIT Argument for Linking Production/Operations and Logistic Management". International Journal of Operations and Production Management; vol. 13, num. 6, pp. 31-43.
128. (Ortiz, *et al*, 1999) Ortiz, A.; Poler, R.; Lario, F, y Vicens, E. (1999). "Integración empresarial. Estado del arte y líneas de futuro". Revista Internacional Información Tecnológica; vol. 10, núm. 4, pp. 267-282.

129. (Parker, 1997) Parker, A. (1997). "The Internationalisation of Retailing and Retailers: the Case of the Republic of Ireland, Dublin". Centre For Retail Studies.
130. (Pawlowski y Akbulut, 2002) Pawlowski, S. Kelle, P. y Akbulut, A. (2002). "The Influence of Quantitative and Organizational Factors on the Cooperation in Supply Chain". ISDS Department, Louisiana State University, Baton Rouge, LA 70803, USA.
131. (Perona y Saccani, 2002) Perona, Marco y Saccani, Nicola (2002). "Integration Techniques and Tools to Manage Customer-Supplier Relationships: An Empirical Research in the Italian Industry of Household Appliances". University of Brescia, Department of Mechanical Engineering, Via Branze 38, 25123 Brescia, Italy.
132. (Porter, 1986) Porter, Michel E. (1986). "Competition in Global Industries". Harvard Business School Press.
133. (Porter, 2000) Porter, M. E. (2000) "Ventaja competitiva: Creación y sostenimiento de un desempeño superior". Compañía Editorial Continental, 19va. Impresión. México.
134. (Prince, 1998) Prince, Theodore (1998). "Procedimientos de la Cumbre de Transporte Intermodal de Norteamérica". Instituto de Transporte Intermodal Proyecto/26 de marzo de 1998. Universidad de Denver en Denver, Colorado, Estados Unidos de América, p 26.
135. (Reguzzoni y Saccani, 2000) Reguzzoni M., Saccani N., (2000). "Strategic Management of Buyer-Supplier Relationships: A Conceptual Framework and an Empirical Research in the Italian Household Appliances Industry". Master Thesis, Politecnico di Milano, Italy.
136. (Robins, 1994) Robins G. (1994). "Sailing into ECR's Uncharted Waters". Sotres, New York; vol. 76, num. 10. pp. 43-44.
137. (Rodríguez, 1999) Rodríguez, de Rivera José (1999). "La coordinación, dimensión esencial del organizar". Dpto. Ciencias Empresariales, Universidad de Alcalá. Página web: http://www.uah.es/estudios_de_organizacion/temas_organizacion/org_praxis/coordinacion.htm
138. (Rubin y Tal, 2005) Rubin, Jeff y Tal, Benjamin (2005). "Soaring Oil Prices Will Make The World Rounder. Economics & Strategy" Occasional Report #55; CIBC World Markets Inc. October 19. Página web: <http://www.cibcwm.com/research>.
139. (Ruesch, 2001) Ruesch, Martin (2001). "Potentials for Modal Shift in Freight Transport". 1st. Swiss Transport Research Conference; STRC 2001; Session Freight. March 1. Página web: <http://www.strc.ch/ruesch.pdf>.
140. (Sarmah, et al, 2005) Sarmah, S.P, Acharya, D. y Goyal, S.K. (2005). "Buyer-Vendor Coordination Models in Supply Chain Management". European Journal of Operational Research (en proceso de su publicación, aceptado el 3 Agosto, 2005).
141. (Shapiro, 2000) Shapiro, Jeremy F (2000). "Modeling the Supply Chain". Duxbury Press; December, 20.
142. (Sierra, 2002) Sierra, Miguel (2002). "La cooepetencia para seducir al cliente". Ediciones de Horticultura, S.L. – 2002. Ingeniero Agrónomo. Master en Tecnología de alimentos de la Universidad Politécnica de Valencia. Página web: <http://www.horticom.com/pd/imagenes/51/629/51629.html#1>.
143. (Simichi, et al, 2000) Simichi-Levi, David, Kaminski, Philip, y Simici-Levi, Edith (2000). "Designing and Managing the Supply Chain: Concepts, Strategies and Case Studies". McGraw-Hill International.
144. (Spens y Bask, 2002) Spens, Karen y Bask, Anu. 2002. "Developing a Framework for Supply Chain Management". The International Journal of Logistics Management; vol. 13, num. 1, pp. 73-88.
145. (Stalk y Haut, 1990) Stalk G.H., Haut T.M., (1990). "Competing Against Time: How Time-Based Competition is Reshaping Global Markets", The Free Press, New York.
146. (Sucky, 2002) Sucky, Eric (2002). "A Single Buyer-Single Supplier Bargaining Problem with Asymmetric Information. Theoretical Approach and Software Implementation". IEEE. Computer, Society. Department of Supply Chain Management, Goethe-University, Mertonstr. 17, 60054 Frankfurt, Germany.

147. (Swensetha y Godfrey, 2002) Swensetha, Scott R. y Godfrey, Michael R. (2002). "Incorporating Transportation Costs Into Inventory Replenishment Decisions". *International Journal Production Economics*; vol. 77, pp. 113-130.
148. (Szlaiksztein, 1997) Szlaiksztein, Gabriel (1997). "Hipótesis y teoría de la organización". *Monografias.com*: Página web: <http://www.monografias.com/trabajos/>
149. (Taylor, 2004) Taylor, David A. (2004). "Supply Chains: A Manager's Guide" Publisher: Addison Wesley Professional, ISBN: 0-201-84463-X 384 pp.
150. (Tersine, 1988) Tersine, R. J. (1988). "Principles of Inventory and Materials Management". New York: North-Holland (3rd. edition).
151. (Thomas y Griffin, 1996) Thomas, Douglas J. y Griffin, Paul M. (1996). "Coordinated Supply Chain Management". *European Journal of Operational Research*; vol. 94, pp. 1-15.
152. (Thomas, 1992) Thomas K. (1992). "Conflict and Negotiation Processes in Organizations" in *Handbook of Industrial and Organizational Psychology*. Vol 3. M Dunnette y L. Hough (eds). Palo Alto, CA, Consulting Psychologists Press, Inc. 1992.
153. (Thompson, 1967) Thompson, James D (1967). "Organizations in Actions". New York: McGraw-Hill, Inc.
154. (Tomé, 2005) Tomé, Raúl (2005). "La gestión eficiente de inventarios". Servicio y Tecnología: Consultoría en Alta Dirección.
155. (Toptal, 2003) Toptal, Ayşgöl (2003). "Generalized Models and Benchmarks for Channel Coordination". Dissertation, Texas A&M University, Doctor of Philosophy.
156. (Towill, *et al*, 2002) Towill, D.R., Childerhouse, P., y Disney, S.M. (2002). "Integrating the Automotive Supply Chain: Where Are We Now?". *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*; vol. 32, num. 2, pp.79-95.
157. (Tseng, *et al*, 2005) Tseng, Yung-yu, Long Yue, Wen y Taylor, Michael A P (2005). "The Role of Transportation in Logistics Chain". *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*; vol. 5, pp. 1657-1672.
158. (Turnbull, *et al*, 1992) Turnbull P., Oliver N., Wilkinson B., (1992). "Buyer-Supplier Relation in the UK Automotive Industry: Strategic Implications of Japanese Manufacturing Model". *Strategic Management Journal*; vol. 13.
159. (van Eijs, 1994) van Eijs, M. J. G.(1994). "Multi-Item Inventory Systems with Joint Ordering and Transportation Decisions". *Int. J. Production Economics*; vol. 35, pp. 285-292.
160. (van Ryzin, 2001) van Ryzin, Garrett J. (2001). "Analyzing Inventory Cost and Service in Supply Chains". Columbia Business School.
161. (Vergin y Barr, 1999) Vergin, R. C. y Barr, K. (1999). "Building Competitiveness in Grocery Supply through Continuous Replenishment Planning: Insights from the Field". *Industrial Marketing Management*; vol. 28, num. 2, pp. 145-153.
162. (Vergin, 1998) Vergin, R. C. (1998). "An Examination of Inventory Turnover in the Fortune 500 Industrial Companies". *Production and Inventory Management Journal*; vol. 39, num. 1, pp. 51-56.
163. (Verity, 1996) Verity, J. (1996) "Clearing the Cobwebs from the Stockroom", *Business Week*, October 21 p. 140.
164. (Vernadat, 1996) Vernadat (1996). "Enterprise Modelling and Integration: Principles and Applications". Chapman and Hall. ISBN 0-412-60550-3, 528 pp.
165. (Verwijmeren, *et al*, 1996) Verwijmeren, J., Vlist, P., y Donselaar, K. (1996). "Networked Inventory Management Information Systems: materializing Supply Chain Management". *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*; vol. 26, num. 6, pp. 16-31.
166. (VICS, 2004) VICS (2004). "CPFR: An Overview of the Model". Voluntary Interindustry Commerce Standards. Association CPFR is a Registered Trademark of VICS. Página web: http://www.vics.org/committees/cpfr/CPFR_Overview_US-A4.pdf.
167. (Villarreal, 2005) Villarreal, Bernardo (2005). "Integración y coordinación logística". Universidad de Monterrey. Página web: <http://www.udem.edu.mx/paso/academico/profesorado/101411/logistica/presentaciones/integracion/INTEGRACION.ppt>.

168. (Viswanathan y Piplani, 2001) Viswanathan, S. y Piplani, Rajesh (2001). "Coordinating Supply Chain Inventories through Common Replenishment Epochs". *European Journal of Operational Research*; vol. 129, pp. 277-286.
169. (Waller, *et al*, 1999) Waller, M., Johnson, M. E. y Davis, T. (1999). "Vendor-Managed Inventory in the Retail Supply Chain". *Journal of Business Logistics, Council of Logistics Management*; vol. 20, num. 1, pp. 183-204. Reprinted with permission of *Journal of Business Logistics*. Página web: http://www.edm1.com/vmi_retail_sc.pdf.
170. (Waters, 2001) Waters, Donald (2001). "Inventory Management". En Brewer, *et al.* (Eds). "Handbook of Logistics and Supply Chain Management". Pergamon, Elsevier Science, Ltd.
171. (White, 2000) White A., (2000). "N-Tier CPFR: a Proposal". Página web: <http://www.cpfr.org>.
172. (Wilson, 1934) Wilson, R.H. (1934). "A Scientific Routine for Stock Control." *Harvard Business Review*; vol. 13, num 2, pp.116-128.
173. (Womack, *et al*, 1990) Womack, James P., Daniel T. Jones, y Daniel Roos (1990). "The Machine That Changed the World". Rawson Associates. ISBN 0-89256-350-8.
174. (Yan, *et al*, 2001) Yan, Dong, Dresner, Martin y Venkatesh, Shankar (2001). "The Impact of Efficient Replenishment and Continuous Replenishment on Supply Chain Outcomes". Paper Work. Carlson School of Management, University of Minnesota, Minneapolis.
175. (Zanoni y Zavanella, 2003) Zanoni, Simone y Zavanella, Lucio (2003). "A Strategy for Vendor Managed Inventory: Analytical Approach and Performance Evaluation". Università Degli Studi di Brescia - Facoltà di Ingegneria, Dipartimento di Ingegneria, Brescia. Italy.
176. (Zenobi, 1998) Zenobi S., (1998). "I rapporti cliente-fornitore nell'insediamento industriale di Melfi: un'indagine sul campo". Master Thesis, Politecnico di Milano, Italy.
177. (Zhao, *et al*, 2002) Zhao, X., Xie, J., y Zhang, J. (2002) "The Impact of Information Sharing and Ordering Coordination on Supply Chain Performance". *Supply Chain Management: An International Journal*; vol. 7, num. 1, pp. 24-40.

Capítulo 3

Modelos matemáticos para la coordinación de los inventarios: Estado del Arte

3.1 Introducción

En el capítulo anterior se ha ilustrado la importancia de la coordinación de inventarios en el contexto general de la gestión de la cadena de suministro. En dicho contexto se identifican los problemas de gestión del sistema de inventarios, y la relevancia de su coordinación entre clientes y proveedores; demostrándose también la relación intrínseca entre el sistema de inventarios y el transporte. Ahora, se busca reconocer todos aquellos elementos que motivan dicha coordinación y la manera en que ha sido abordada por investigadores a nivel internacional.

El objetivo de este capítulo está dirigido a identificar aquellos vacíos que pueden ser estudiados y que complementen, pero sobre todo, fundamenten los modelos propuestos para el problema de la coordinación de inventarios.

Por lo anterior, la estructura de este capítulo presenta, en primer término, el planteamiento general del problema de la coordinación de inventarios que ha dado origen a una infinidad de trabajos de investigación, desde el punto de vista del cliente y del proveedor (política individual), así como del sistema (política conjunta). Por este motivo, en las secciones a continuación se desarrolla el estado del arte del tema que motiva esta investigación.

A partir de la revisión realizada a la literatura disponible, este capítulo se encuentra estructurado en cuatro apartados principales. El primero, está orientado a presentar el planteamiento técnico del problema de la coordinación de los inventarios; el segundo, contiene un análisis detallado de los modelos matemáticos más recientes y avanzados, que son clasificados de acuerdo con la estructura básica de la cadena de suministro. El tercero, abarca el estudio de los modelos de coordinación del sistema de inventarios que tienen en cuenta, de manera explícita, las variables fundamentales del transporte: clasificados también bajo el mismo criterio; en el cuarto, se exponen las

conclusiones en torno al tratamiento que ha recibido este tema por parte de los investigadores a nivel internacional.

Debido a la gran cantidad de artículos que tratan el tema y por el interés que prevalece en esta investigación, se decidió discriminar los artículos que abordan la coordinación con un enfoque estocástico, es decir, únicamente se reportan artículos del ámbito determinista, con alguna excepción por el aporte directo que representa a esta tesis. Cabe señalar que los modelos que inspiran el tema de esta investigación aparecen de manera más detallada en el capítulo 5. Al final, se presenta un cuadro resumen de los modelos de acuerdo con las características principales que los distinguen. Evidentemente, la estructura de este capítulo tiene el propósito de conocer ¿Cuál es el estado del arte sobre la coordinación de los inventarios?

3.2 Generalidades de los modelos de inventarios

En general, los modelos matemáticos para el control de inventarios son usados en forma indistinta para describir el reabastecimiento con un proveedor externo o producción interna. Esto significa que desde el punto vista del modelo, el control de inventarios y la planeación de la producción con frecuencia son sinónimos (Nahmias, 1999). Su principal objetivo está orientado a satisfacer las necesidades de los clientes y su principal diferencia es que la demanda puede ser constante o variable en el tiempo, determinista o aleatoria, predecible o impredecible. De esta manera, por el tipo de demanda que se analiza, los modelos de inventarios pueden clasificarse tal y como se muestra en la figura 3.1.

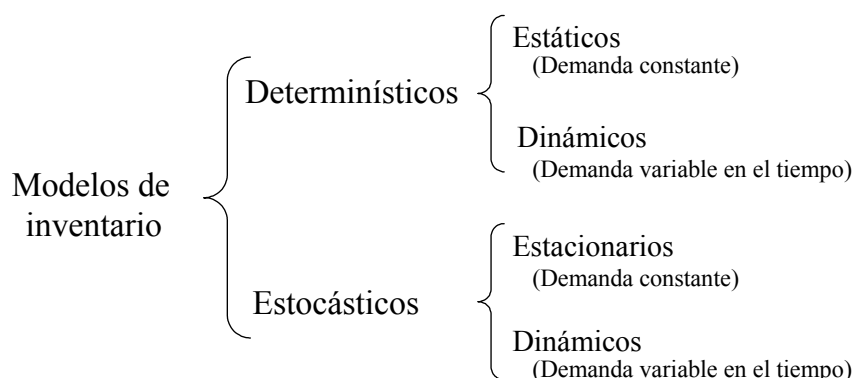


Figura 3.1
Tipos de modelos de inventario

Regularmente los modelos de inventario son clasificados de acuerdo a si se conoce o no la demanda en un período determinado, llamándose en este caso deterministas, y estocásticos cuando se trabaja con cantidades posibles. Seleccionar una adecuada política de gestión de inventarios puede incidir de manera significativa en los costes de una empresa.

Un modelo de inventario se utiliza para establecer una política óptima para que, de manera sencilla, se pueda determinar cuándo efectuar un pedido (o proceso de fabricación) y el tamaño del lote por adquirir o fabricar. Lo anterior tiene dos objetivos bastante claros: *i*) mantener cierta cantidad de mercancía en existencia durante un período fijo para minimizar los costes, y *ii*) lograr el mejor nivel de servicio al cliente.

El modelo básico que define esta situación es conocido como “Lote Económico de la Orden” (*Economic Order Quantity, EOQ*, por sus siglas en inglés). Dicho modelo ha sido ampliamente utilizado y extendido por muchos investigadores. Las primeras extensiones consideran descuentos por volúmenes de compra, cambio del precio de los productos en el tiempo, restricciones de capacidad de producción, tasa de producción infinita, ente otros.

El desarrollo matemático de este tipo de modelos se encuentra ampliamente ilustrado en la literatura, y por lo tanto, intencionalmente se omite su presentación en este trabajo. No obstante, puede mencionarse que este modelo se ha tomado como base por muchos investigadores para desarrollar políticas de gestión de inventarios desde el punto de vista de la coordinación. De hecho, los trabajos realizados en torno a dicho tema se les han dado por llamar “*El Problema del Tamaño de Lote*” (*Lot-Size Problem; LSP*, por sus siglas en inglés). Precisamente, utilizando el modelo clásico *EOQ*, en la sección a continuación se presenta el planteamiento general de algunos de los modelos de coordinación de inventarios que han surgido.

3.3 Planteamiento general del problema de coordinación de inventarios

Cuando los problemas de inventario del cliente y proveedor son tratados de manera independiente bajo condiciones deterministas, los modelos utilizados para ordenar (*EOQ: Economic Order Quantity*) o para producir/entregar (*ELS: Economic Lot Size*) ofrecen una solución óptima. Sin embargo, una política basada en un modelo *EOQ* generalmente no es aceptable por el proveedor; en contraparte, una política de

producción y períodos de entrega basada en un modelo *ELS* del proveedor, puede ser inaceptable por el cliente.

La coordinación entre la política de cantidades y períodos para lanzar una orden y su entrega (producción) es un problema que en años recientes ha recibido bastante atención. Bajo diferentes supuestos y condiciones, algunos autores han sugerido diversos modelos para determinar el tamaño de lote conjunto (*JELS: Joint Economic Lot Size*) con el objetivo de minimizar los costes relevantes de ambas partes (proveedores y clientes). Los modelos construidos han demostrado que una coordinación o integración de la política de inventario es más deseable que políticas individuales óptimas de los socios comerciales. No obstante, es requisito que el socio comercial con menor poder de negociación forcé su *EOQ* o *ELS* sobre el otro. De otra manera, no existirá un incentivo para que ambos socios pongan en marcha una política de cooperación.

Generalmente, el socio con mayor poder de negociación siempre estará en desventaja al adoptar una solución conjunta. Sin embargo, sus pérdidas estarán más que compensadas por las ganancias del otro socio. En tal virtud, es necesaria la instauración de un mecanismo que permita al socio en desventaja, verse también beneficiado.

El mecanismo comúnmente empleado por diversos autores, ha sido el relacionado con el precio de los productos tratado como una variable de decisión. Por lo anterior, el pedido y las cantidades entregadas son determinados por medio de un proceso de negociación entre clientes y proveedores.

3.3.1 Política individual del cliente¹

Considerando el caso más simple, se asume que existe un proveedor que abastece un producto a sólo un cliente que presenta una demanda D determinista y constante; no se permiten faltantes y las entregas son inmediatas (es decir, que el tiempo de ciclo es cero); bajo un horizonte de tiempo infinito se ha establecido que el cliente, que determina de manera individual el tamaño de su orden Q_B , incurre en los costes totales relevantes (TRC_B) definidos por la siguiente expresión:

¹ Basado en Sucky, 2002.

$$TRC_B(Q_B) = \frac{A_B D}{Q_B} + \frac{Q_B}{2} \cdot h_B \quad (3.1)$$

En donde, los costes por ordenar A_B y de almacenamiento h_B afectan al coste total.

El objetivo del cliente es minimizar sus costes totales relevantes por período. Para ello, el cliente lanza su pedido en el momento que el nivel de inventario se reduce a cero. Por lo tanto, el tamaño de lote a ordenar y su coste total relevante por período, están definidos por:

$$Q_B^* = \sqrt{\frac{2A_B D}{h_B}} ; \quad TRC_B(Q_B^*) = \sqrt{2A_B D h_B} \quad (3.2)$$

3.3.2 Política individual del proveedor

El proveedor (fabricante) elabora el producto a una tasa de producción P en lotes de tamaño Q_V e incurre en un coste fijo por cada lote producido. Se asume que la tasa de producción P es mayor que la demanda D . Para definir una política de producción y entrega, el proveedor tiene que considerar que existen costes fijos de producción que incluyen los costes de entrega asociados con cada uno de los envíos; por ejemplo, costes de inspección, empaque, manejo y envíos de la producción.

El objetivo del proveedor es minimizar sus costes totales relevantes por período, los cuales, comprenden los costes fijos de producción y de inventario. Banerjee (1986) demuestra que los costes promedio de inventario con una política “*lote por lote*”, son determinados por:

$$\text{Inventario promedio} = \frac{Q_V}{2} \cdot \frac{D}{P} \quad (3.3)$$

Los costes relevantes por período $TRC_V(Q_V)$, para cualquier tamaño del lote Q_V , está determinado por:

$$TRC_V(Q_V) = \frac{A_V \cdot D}{Q_V} + \frac{Q_V}{2} \cdot \frac{D}{P} \cdot h_V \quad (3.4)$$

Donde:

P = Tasa de producción del proveedor [unidades/período]

A_v = Coste fijo del proveedor por preparación, fabricación y procesamiento por envío al cliente [\\$]

h_v = Coste de inventario del proveedor [\$/unidad por período]

Q_v = Tamaño de lote del proveedor [unidades]

Por su parte, el tamaño de lote de producción/entrega (*ELS*) y el coste relevante mínimo por período del proveedor, están determinados por:

$$Q_v^* = \sqrt{\frac{2 \cdot A_v \cdot P}{h_v}} ; \quad TRC_v(Q_v^*) = D \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot A_v \cdot h_v}{P}} \quad (3.5)$$

3.3.3 Política conjunta de coordinación cliente-proveedor

Si un proveedor sigue una producción lote por lote, la cantidad fabricada corresponde a la cantidad ordenada/entregada. Para el cliente, la cantidad recibida corresponde al tamaño del lote ordenado. Así, la solución conjunta del tamaño de lote corresponde a la cantidad ordenada se representa como $Q_B = Q_v$. La solución *JELS* conduce a ciclos de inventario como los que se muestran en la figura 3.2.

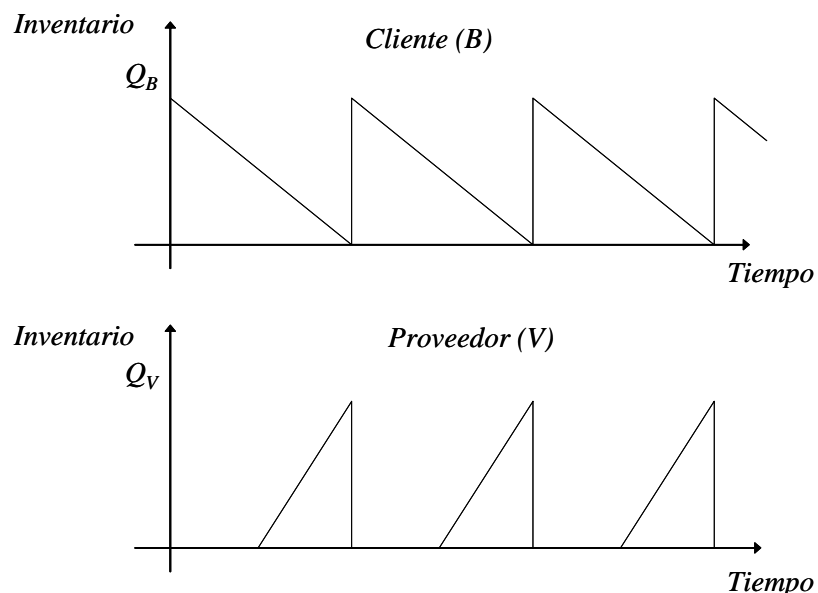


Figura 3.2
Ciclo del inventario conjunto cliente-proveedor

Fuente: Sucky (2002).

Banerjee (1986) sugiere un modelo de lote económico conjunto (*JELS*), el cual tiene como objetivo principal, minimizar el coste total relevante para ambos socios comerciales (cliente-proveedor), determinado a partir de los costes totales óptimos individuales como:

$$TRC_J(Q_J) = (A_B + A_V) \cdot \frac{D}{Q_J} + \frac{Q_J}{2} \cdot \left(h_B + \frac{D}{P} \cdot h_V \right) \quad (3.6)$$

Con base en que el tamaño de lote conjunto sea igual al individual ($Q_J = Q_B = Q_V$).

Por su parte, la cantidad de lote económico conjunto (Q_J^*) y los costes totales relevantes mínimos ($TRC_J(Q_J^*)$) para el sistema (cliente-proveedor) por período, están determinados por:

$$Q_J^* = \sqrt{\frac{2 \cdot D \cdot (A_B + A_V)}{h_B + \frac{D}{P} \cdot h_V}} ; \quad TRC_J(Q_J^*) = \sqrt{2 \cdot D \cdot (A_B + A_V) \cdot \left(h_B + \frac{D}{P} \cdot h_V \right)} \quad (3.7)$$

Para el caso más común ($Q_B \neq Q_V$), el tamaño conjunto de la orden está situada en el intervalo de la solución individual $Q_J^* \in]Q_B^*, Q_V^*[$. La figura 3.3, muestra las funciones de coste de ambos socios comerciales y la función de los costes conjuntos relevantes para el caso de que $Q_B \neq Q_V$.

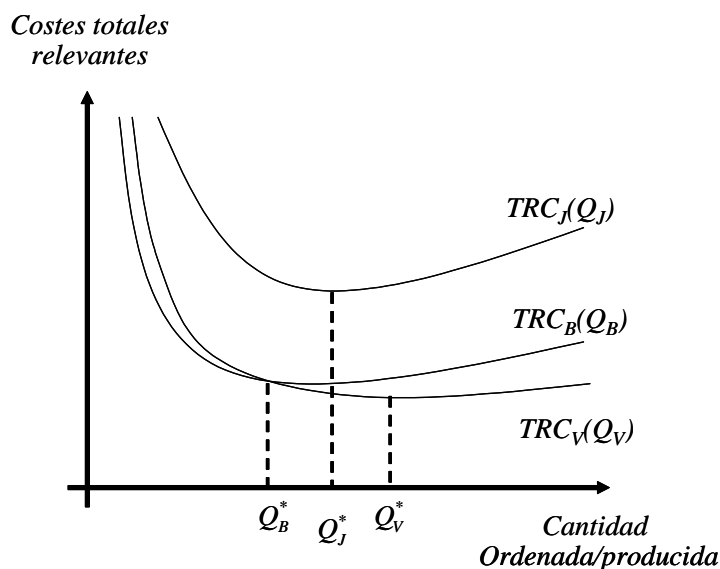


Figura 3.3
Funciones de coste

Fuente: Banerjee (1986).

Para cualquier política conjunta $Q_J \in [Q_B^*, Q_V^*]$, el coste total relevante del cliente se define como:

$$TRC_B(Q_J) = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{Q_B^*}{Q_J} + \frac{Q_J}{Q_B^*} \right) \cdot TRC_B(Q_B^*) \quad (3.8)$$

Y el coste total relevante para el proveedor, se determina como:

$$TRC_V(Q_J) = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{Q_V^*}{Q_J} + \frac{Q_J}{Q_V^*} \right) \cdot TRC_V(Q_V^*) \quad (3.9)$$

$$\text{con:} \quad \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{Q_B^*}{Q_J} + \frac{Q_J}{Q_B^*} \right) > 1, \quad \forall Q_J, Q_B^* > 0; Q_J \neq Q_B^* \quad (3.10)$$

$$\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{Q_V^*}{Q_J} + \frac{Q_J}{Q_V^*} \right) > 1, \quad \forall Q_J, Q_V^* > 0; Q_J \neq Q_V^* \quad (3.11)$$

Si el cliente y el proveedor se conducen individual y razonablemente, seleccionarán su política óptima Q_B^* y Q_V^* . Sin embargo, en el caso de que $Q_B \neq Q_V$ la política conjunta $Q_J = Q_B = Q_V$, sólo puede lograrse de una negociación entre las partes. Si el cliente tiene la mejor posición de negociación sobre el proveedor, entonces no existiría una iniciativa de su parte para activar alguna política conjunta, es decir: $Q_J \in [Q_B^*, Q_V^*]$. Esencialmente la ecuación (3.11) muestra que el cliente va estar en desventaja si acepta la solución conjunta; esto es, aumenta el tamaño de su pedido y por lo tanto, sus costes. Como ya se dijo antes, cualquier política conjunta lleva al proveedor a obtener menores costes totales individualmente. Por lo tanto, para que el cliente acepte alguna clase de política conjunta, el proveedor le deberá ofrecer un incentivo como compensación (por ejemplo, monetario). Asumiendo que la información que comparten los socios comerciales es completa y verídica, es fácil demostrar que la política óptima conjunta (Q_J^*), bajo un acuerdo de compensación monetaria de magnitud $z = TRC_B(Q_J^*) - TRC_B(Q_B^*)$, puede ser consecuencia de las negociaciones comerciales.

A continuación se presenta una revisión de la literatura que trata los modelos relacionados con la coordinación de inventarios, clasificada de acuerdo con la estructura básica de la cadena de suministro.

3.4 Estructuras básicas de los modelos de coordinación de inventarios

En los últimos años han surgido un gran número de estudios relacionados con la coordinación de inventarios entre clientes y proveedores. Los autores de dichos estudios han colocado a los problemas de inventario en distintos escenarios de análisis, bajo supuestos y contextos muy diversos. Abarcan, desde las estructuras más simples (cliente-proveedor) hasta las más complejas (multieslabón) operadas con estrategias modernas e interesantes.

En esta sección se describen brevemente algunos de los documentos más reciente que investigan la coordinación de inventarios, clasificados por la estructura de su análisis. Es importante reconocer que el caso de múltiples clientes o proveedores, representa una generalización del problema básico (un cliente-un proveedor) en el ámbito de la teoría multieslabón de los inventarios.

3.4.1 Coordinación entre un proveedor y un cliente

En 1976, Goyal sugiere uno de los primeros modelos conocidos como *JELS* (*Joint Economic Lot Size*), el cual determina de manera conjunta el tamaño de lote económico del proveedor (Q_V) y del cliente (Q_B), con el objeto de minimizar los costes totales relevantes de ambos y del sistema, calculados con la siguiente expresión:

$$JELS = \frac{DA_B}{Q_B} + \frac{h_B Q_B}{2} + \frac{A_V D}{n Q_V} + \frac{h_V (n-1) Q_V}{2} \quad (3.12)$$

Donde A_B y A_V son los costes fijos de resurtido del cliente y del proveedor, y h_B y h_V son los costes de manutención de inventario en coste/unidad/tiempo, respectivamente y n un entero múltiple. Los dos primeros términos de la expresión (3.12) representan los costes totales del proveedor por unidad de tiempo, y los dos últimos términos son los costes totales del vendedor por unidad de tiempo.

Monahan (1984) estudia el problema de un proveedor y un cliente utilizando el modelo de lote económico (*EOQ*). Para efectos prácticos, establece que el tamaño del lote de abastecimiento del proveedor, en cada período es igual a la cantidad ordenada por el cliente. Con base en este planteamiento Monahan (1984) propuso un modelo de descuento por volumen, demostrando que el proveedor podría aumentar sus ganancias motivando al cliente comprar una cantidad mayor a cambio de un descuento en el precio. En este sentido y ofreciendo un descuento para compensar el aumento en los costes de manutención de inventarios, este autor establece que el proveedor puede motivar al cliente para que aumente la cantidad de pedido en un factor $K^* = \sqrt{1 + A_V / A_B}$, en donde, A_V y A_B son los costes por ordenar del proveedor y del cliente, respectivamente. Nótese que dicha expresión es independiente de los costes de manutención de inventarios. Esto implica que, sin tener en cuenta los valores de los costes fijos, K^* es siempre mayor que uno. De ahí que el proveedor siempre estará animando a su cliente para que aumente el tamaño de su orden.

Lee y Rosenblatt (1986) desarrollaron un algoritmo para determinar simultáneamente el factor k que aumenta la cantidad óptima a ordenar y la cantidad de resurtido del proveedor. El objetivo es maximizar el descuento en el precio por la cantidad de abasto de un producto a un cliente. Cuando el cliente usa una política *EOQ*, y los costes de ordenar y de almacenamiento son conocidos, cierta cantidad de pedido puede lograrse por medio de un apropiado programa de descuentos del precio por volumen. Estos autores extendieron el trabajo de Monahan (1984), requiriendo un mínimo de beneficios marginales, y permitiendo al proveedor comprar cualquier volumen más allá que lote por lote.

Más tarde, el modelo fue generalizado por Banerjee (1986), desarrollando un modelo bajo el supuesto de que los costes de preparación de la producción se incurren todo el tiempo que es lanzada una orden. Él demostró que el tamaño del lote óptimo (Q_j^*), para producir u ordenar, puede obtenerse con la expresión ya indicada en la sección 3.3.3.

En Goyal (1988) y Goyal y Gupta (1989) el modelo anterior se extiende, relajando el supuesto de lote por lote. Estos autores, argumentan que el tamaño del lote económico de producción es un múltiplo del tamaño del lote del cliente. Por lo tanto,

para un entero múltiple n , el tamaño del lote económico del pedido del cliente es calculado por:

$$Q^* = \left(\frac{2D \left(A_V + \frac{A_B}{n} \right)}{r \left(C_Q - C_V + nC_V \left(1 + \frac{D}{P} \right) \right)} \right)^{1/2} \quad (3.13)$$

Donde el valor de n debe satisfacer la siguiente igualdad:

$$n^* (n^* + 1) \geq \frac{A_B (C_Q - C_V)}{A_V C_V \left(1 + \frac{D}{P} \right)} \geq n^* (n^* - 1) \quad (3.14)$$

Por su parte, los costes totales del sistema son determinados por:

$$JTRC(n) = \left[2Dh \left(A_B + \frac{A_V}{n} \right) \left(C_Q - C_V + nC_V \left(1 + \frac{D}{P} \right) \right) \right]^{1/2} \quad (3.15)$$

Donde

$JTRC$ = Costes totales relevantes (*Joint total relevant cost*)

D = Demanda anual del producto

P = Tasa anual de producción del proveedor

C_V = Coste unitario de producción del producto

C_Q = Costes de adquisición pagado por el cliente

A_B = Costes por ordenar del cliente

A_V = Coste fijo de preparación del proveedor

h = Costes de manutención de producto por dólar invertido por almacenar

Q = Tamaño del lote de producción del proveedor (o cantidad solicitada por el cliente)

Utilizando las estrategias de Resurtido Eficiente (*ER*) y Resurtido Continuo, (*CR*), Dong, *et al.* (2001), llevan a cabo un estudio con el objeto de conocer el impacto de estas dos estrategias en la gestión de inventarios entre un cliente y un proveedor. Dichos autores formulan un modelo basado en la teoría de juegos de una cadena de suministro. Para ello, consideran dos estructuras de modelado en el contexto de la teoría de juegos de Stackelberg: *i*) el cliente actúa como el líder y los proveedores, asumen el papel de los seguidores, y *ii*) cuando un proveedor dominante representa al líder y los clientes actúan como los seguidores. A partir de estos planteamientos, obtienen resultados analíticos sobre el impacto de ambas estrategias (*ER* y *CR*),

considerando los siguientes cuatro casos: *a)* cuando el cliente solamente reduce sus costes por ordenar y adopta la estrategia *ER*, pero el proveedor es incapaz de implantar un programa eficaz *ER* y reducir sus costes de preparación, *b)* cuando el cliente adopta *CR*, y el proveedor es incapaz de reducir sus costes de preparación, *c)* cuando ambos (proveedor y cliente) ponen en práctica *ER* reduciendo sus costes por ordenar y de preparación, y *d)* cuando un proveedor y el cliente conjuntamente ponen en práctica un programa integrado *ER* (cadena de suministro coordinada).

Uno de los resultados principales que arrojó este estudio es que, cuando el cliente es el líder, ambos se benefician si el proveedor es capaz de reducir con éxito su coste fijo. Además, si un proveedor es incapaz de reducir su coste fijo, entonces el programa *CR* puesto en práctica por el cliente, reducirá tanto los beneficios del proveedor como los del cliente. En cuanto a las estructuras de la cadena de suministro, tanto el cliente como el proveedor se beneficiarán con mayor probabilidad de la estrategia *ER* cuando el proveedor domina la relación. Finalmente, una coordinación de la estrategia *ER* aumenta los beneficios sin condiciones para ambas partes. Desde la perspectiva gerencial, la conclusión principal es que para aprovechar los beneficios, el cliente y el proveedor deben trabajar juntos para poner en práctica estrategias *ER* o *CR* de manera conjunta.

En ese mismo contexto, Dong y Xu (2002) desarrollan un modelo bajo un escenario donde el cliente juega el papel de líder y especifica las cantidades ordenadas de acuerdo a sus características de coste, anteponiendo el precio contratado de compra. El proveedor no tiene alternativa y debe aceptar el precio. El planteamiento parece ser muy agresivo, y en realidad lo es. Por lo tanto, bajo la estrategia de coordinación de inventarios administrados por el vendedor (*VMI*), desarrollaron un modelo para evaluar el efecto que existe sobre los proveedores y clientes en el corto y largo plazo.

Así, en un ambiente de coordinación de inventarios con la estrategia *VMI*, se establece que el cliente no manejará grandes sistemas de inventarios, dejando esto exclusivamente al proveedor para que él defina los niveles de inventario, tamaño del pedido, tiempo de entrega, etc. Como resultado de lo anterior, el proveedor asumirá los costes combinados de procesamiento de ordenes ($A_V + A_B$) y de almacenamiento

$(h_V + h_B)$ de ambos socios comerciales. Por lo tanto, la función de beneficios del proveedor, en términos de su volumen (Q), se expresa como:

$$\Pi_V^c = w_c Q - c(Q) - [2(A_V + A_B)(h_V + h_B)Q]^{1/2} \quad (3.16)$$

Donde w_c representa el nuevo precio que el cliente utiliza para inducir al proveedor a manejar su sistema de inventarios. Es decir, representa el precio contratado de adquisición bajo la estrategia *VMI*. Note que el subíndice c es utilizado para indexar las variables de decisión (por ejemplo: precio de compra, cantidades, etc.), mientras que el superíndice c indexa los beneficios en la estrategia *VMI*.

Con base en lo anterior, la función de beneficio de los clientes se reduce a:

$$\Pi_B^c = p(Q)Q - w_c Q \quad (3.17)$$

Como es evidente, con la política de coordinación de inventarios *VMI*, el cliente no administra su sistema de inventarios, y por lo tanto, su coste en este rubro no es significativo en su función de beneficios.

Bajo este esquema de administración de inventarios, Dong y Xu (2002) dedujeron que el proveedor alcanzará su beneficio máximo, siempre y cuando la relación entre el precio de venta y las cantidades adquiridas (Q) cumpla la siguiente condición:

$$w_c = c'(Q_c) + \frac{1}{2} \left(\frac{2(h_B + h_V)(A_B + A_V)}{Q_c} \right)^{1/2} \quad (3.18)$$

De igual modo, la cantidad óptima de compra (Q_c^*) se logrará en los términos que se cumpla la siguiente condición:

$$p'(Q_c^*)Q_c^* + p(Q_c^*) - c'(Q_c^*) - c''(Q_c^*)Q_c^* - \frac{1}{4} \left(\frac{2(h_B + h_V)(A_B + A_V)}{Q_c^*} \right)^{1/2} = 0 \quad (3.19)$$

$$\text{ó} \quad p'(Q_c^*)Q_c^* + p(Q_c^*) - c'(Q_c^*) - c''(Q_c^*)Q_c^* - \frac{1}{4} (w_c^* - c'(Q_c^*)) = 0 \quad (3.20)$$

El precio de adquisición óptimo (w_C^*) y el precio de venta final del producto, (p_C^*) pueden ser calculados respectivamente basados en (Q_C^*).

Desde un punto de vista global, la suma de las funciones de beneficio del proveedor y el cliente, permite evaluar los beneficios totales del sistema, expresado como:

$$\Pi_B + \Pi_V = p(Q)Q - c(Q) - \left(\frac{A_B Q}{Q_B} + \frac{h_B}{2} Q_B \right) - \left(\frac{A_V Q}{Q_V} + \frac{h_V}{2} Q_V \right) \quad (3.21)$$

Basado en lo anterior, Dong y Xu (2002) establecen que la eficiencia de la coordinación y su efectividad en la gestión de la cadena de suministro pueden ser evaluadas por medio de la diferencia entre las funciones de beneficio, con y sin estrategia *VMI*, es decir:

$$[\Pi_B^C(Q) + \Pi_V^C(Q)] - [\Pi_B(Q) + \Pi_V(Q)] = \left(\frac{h_B A_B Q}{2} \right)^{1/2} \left[\left(1 + \frac{A_V}{A_B} \right)^{1/2} - \left(1 + \frac{h_V}{h_B} \right)^{1/2} \right]^2 \geq 0 \quad (3.22)$$

El resultado anterior, indica que mientras exista algún desajuste entre la proporción de los costes de adquisición y almacenamiento del proveedor y el cliente ($A_V / A_B \gg h_V / h_B$), los beneficios totales del sistema van a mejorar con la estrategia *VMI*. Esto es verdadero a pesar de que el beneficio del proveedor sea creciente o no con una estrategia *VMI*.

Por otro lado, Dong y Xu (2002) reconocen que la coordinación es un estado ideal para la gestión de la cadena de suministro. Y que ésta puede lograrse si el beneficio conjunto ($\Pi_B + \Pi_V$) es maximizado. Estos autores establecen que durante el cambio de un programa de inventario a una coordinación plena, la cantidad adquirida (Q) se mantiene constante en el corto plazo, y Q_B puede ajustarse por ambas partes (proveedores y clientes) hacia Q_B^J (denótese una situación óptima de los beneficios conjuntos con el superíndice J), deduciendo que los beneficios conjuntos pueden ser maximizados cuando:

$$Q_B^J = Q_B^C = [2(A_V + A_B)h_V / (h_V + h_B)]^{1/2} \quad (3.23)$$

Señalan que lo anterior, lleva a que los beneficios conjuntos sean mayores o iguales a la suma de los beneficios individuales, es decir:

$$\Pi_B^C(Q) + \Pi_V^C(Q) = \Pi_B^J(Q) + \Pi_V^J(Q) \geq \Pi_B(Q) + \Pi_V(Q) \quad (3.24)$$

Las contribuciones de Hill (1997 y 1999) se enfocan ha minimizar el coste total del sistema proveedor-cliente, el supuesto básico es que el vendedor conoce la demanda del cliente y la frecuencia de pedido. En consecuencia, el modelo es aplicado en esquemas donde existe cooperación entre las partes, independientemente de que éstas pertenezcan o no a la misma compañía. El modelo de Hill considera los costes en los que se incurre en el proceso de entrega, por lo que el problema del número óptimo de entregas es discutido ampliamente. Este autor, señala que tanto el proveedor como el cliente incurren en costes de manutención de inventarios, dependiendo de las diferentes tasas y longitud de tiempo en que los materiales son almacenados. Por lo tanto, afirma que el tamaño de lote económico bajo estas consideraciones está determinado por:

$$Q^* = \left[\left[(A_V + nA_B) \frac{D}{n} \right] / \left[h_V \left(\frac{D}{P} + \frac{(P-D)n}{2P} \right) + \frac{h_B - h_V}{2} \right] \right]^{1/2} \quad (3.25)$$

En donde, A_V es el coste fijo incurrido por el proveedor por producir un lote; A_B el coste en que incurre el cliente por realizar un pedido; h_V y h_B los costes en que incurren el proveedor y el cliente por almacenar un producto por un período de tiempo; P es la tasa de producción; D es la tasa de demanda observada por el cliente; n es el número de operaciones de transporte (envíos) por lote producido; q el tamaño de lote transportado por entrega, para el cual el tamaño de lote es producido ($Q = nq$). Este modelo asume que $P > D$ y $h_B > h_V$.

En este contexto, Braglia y Zavanella (2003) elaboran un modelo generalizado para el caso de ventas a consignación o estrategia *VMI*. Como en Hill (1997), asumen que el proveedor produce por lotes y por lo tanto incurre en costes fijos de preparación de acuerdo al tamaño del lote. Incluyen los costes de procesamiento de envíos, alguno de los cuales se llevan a cabo durante la corrida de producción. De esta manera, el cliente y el proveedor están sujetos a costes fijos por emitir ordenes y enviar los pedidos (C_o^B, C_s^V), asumiendo que son independientes de la cantidad (Q) que será transferida.

Ambas partes incurrir en coste por mantenimiento de inventarios (C_m^V, C_m^B), aunque a diferentes tasas, las cuales aumentan conforme el tiempo de almacenamiento crece.

Por lo anterior, Braglia y Zanavella (2003) establecen que el coste promedio del proveedor por año está compuesto por dos factores: costes fijos de preparación $C_s^V = A_V (D/nQ)$ y los costes de mantenimiento de inventarios $C_m^V = h_V (QD/2P)$. Por su parte, los costes del cliente, son definidos por: $C_o^B = A_B (D/Q)$ y $C_m^B = h_B/2 [nQ - (n-1)(Q/P)D]$.

Siendo los costes totales para el sistema:

$$C = (A_V + nA_B) \frac{D}{nQ} + h_B \left(\frac{DQ}{P} + nQ \frac{P-D}{2P} \right) - (h_B - h_V) \left(\frac{QD}{2P} \right) \quad (3.26)$$

Mientras que la cantidad óptima está determinada por:

$$Q^* = \left(\frac{(A_V + nA_B) \frac{D}{n}}{h_B \left(\frac{DQ}{P} + nQ \frac{P-D}{2P} \right) + (h_B - h_V) \left(\frac{D}{2P} \right)} \right)^{1/2} \quad (3.27)$$

Antes, Lu (1995) desarrolló un modelo cuyo objetivo primordial es el de minimizar el coste total anual del proveedor, maximizando el coste total que el cliente podría estar dispuesto a incurrir. Su argumento principal se basa en la dificultad del proveedor por conocer o estimar los costes de almacenamiento y de procesamiento de ordenes del cliente, a menos que éste último quiera revelar los valores reales.

Otros autores han estudiado el problema de coordinación del tamaño de lote económico considerando restricciones de capacidad. Por ejemplo, Robinson y Lawrence (2004) formulan un problema entero mixto y un procedimiento de solución utilizando el método de relajación lagrangeana para una familia de productos con demanda dinámica y determinista. El modelo define los períodos de resurtido que minimizan los costes de abasto, inventario y escasez o faltantes para esa familia de productos para un horizonte finito de tiempo. En general, este tipo de trabajo se apoya en las consideraciones hechas por Silver (1979), las cuales señalan que si una familia de

productos comparte un mismo proveedor, modo de transporte o instalaciones de producción, pueden enfrentar limitaciones en los recursos.

En general, estos primeros modelos demostraron que bajo el escenario de un proveedor que abastece un producto a sólo un cliente, la política coordinada de inventario es más deseable que la política individual óptima. En general, los resultados de los modelos normalmente determinan que el tamaño de lote económico conjunto reduce el coste del proveedor, pero aumenta los del cliente. Sin embargo, el supuesto base es que existe un equilibrio perfecto del poder de negociación entre el cliente y el proveedor, y que llevan a cabo esfuerzos por lograr acuerdos. Estos autores generalmente comparan los resultados obtenidos de una política conjunta contra los conseguidos al aplicar políticas independientes.

Por lo anterior, se ha puesto más atención al estudio de los mecanismos que permiten compartir las ventajas de la coordinación. En este sentido, para animar al cliente a comprar lotes más grandes de producción, los estudios se han orientado al desarrollo de modelos que consideran mejores precios o descuento por volumen. Dicho mecanismo han fomentado, a su vez, el modelado de diversas estrategias de coordinación y cooperación. De hecho, los modelos antes revisados han sido extendidos también al caso multieslabón, es decir, multi-proveedores y multi-clientes. Algunos de estos modelos se revisan a continuación.

3.4.2 Coordinación entre un proveedor y múltiples clientes

Banerjee y Banerjee (1994) desarrollan un modelo analítico para el control coordinado del inventario de un producto entre un proveedor y múltiples clientes. Consideran la demanda estocástica y tiempos de ciclo de abasto comunes. Enfocan su atención al uso de la tecnología para el intercambio electrónico de datos (EDI), bajo el cual, argumentan que EDI hace factible vincular, en tiempo real, múltiples clientes con el proveedor, permitiendo a este último supervisar el patrón de consumo de los clientes. En consecuencia, no es necesario que los clientes lancen pedidos, ya que el proveedor puede enviar el material necesario de acuerdo al sistema de decisión establecido. La investigación asume que todas las partes involucradas acuerdan envíos de producto de acuerdo con las cantidades preestablecidas en un intervalo común a todos los clientes, característica específica de la estrategia *VMI*. Señalan que el problema principal de esta

estrategia, es que el proveedor asume toda la responsabilidad de las decisiones relacionadas con el inventario de los clientes.

Woo, *et al.* (2001) formulan un modelo integrado de inventario donde considera un proveedor que adquiere y procesa su materia prima para entregar productos terminados a múltiples clientes en un ciclo común. El proveedor y todos los clientes buscan reducir la inversión en costes por ordenar (por ejemplo, estableciendo un control de inventarios basado en un sistema de intercambio electrónico de datos), para reducir el coste total conjunto. Este modelo extiende el trabajo de Banerjee y Banerjee (1994) pero el proveedor toma las decisiones de abasto para optimizar el coste total del sistema.

Klastorin, *et al.* (2002) proponen y analizan una política de suministro de un fabricante (por ejemplo un *OEM*, *Original Equipment Manufacturer*) que *terceriza* la producción de un producto a un proveedor de primer nivel; quién a su vez, lo fábrica a con la participación de un conjunto $J = \{1, \dots, N\}$ de detallistas. Por lo tanto, los detallistas abastecen el inventario del proveedor de primer nivel; en tanto, que este último suministra el inventario del *OEM* en intervalos de orden predefinidos. Asumen que la demanda en los detallistas es constante en el tiempo y que éstos incurren en un coste de inventario promedio.

Con la finalidad de aumentar sus ganancias, el fabricante ofrece un descuento de precios a cualquier detallista que lance una orden y que coincida con el inicio del ciclo de fabricación. Suponen que el fabricante ofrece dicha estrategia para evitar mantener unidades en inventario (es decir, realizar una operación del tipo “*justo a tiempo*”). De esta manera, los detallistas que lancen ordenes en cualquier otro momento del ciclo de fabricación pagarían el precio normal de catálogo por unidad. Los objetivos de este estudio se abocaron a desarrollar una metodología eficiente para encontrar el descuento óptimo, y describir las condiciones que deben existir para que un fabricante ofrezca dicho descuento.

Asimismo, los autores se enfocaron a investigar la magnitud de los ahorros (o ganancias) que podría acumular un fabricante que ofrece tal descuento, e identificar las condiciones (incluso el número y las características de los detallistas) cuando dicho esquema es beneficioso para todos los participantes de la cadena de suministro.

Chan y Kingsman (2003) llevan a cabo una propuesta muy interesante sobre la coordinación de un proveedor con respecto a varios clientes. Buscan reducir el nivel del inventario por medio de la sincronización de los ciclos de pedido y de producción. La sincronización se logra por medio del diseño de un programa de los días de pedido de los clientes, coordinado con el ciclo de producción del proveedor. Con ello, establecen que, para lograr el menor coste conjunto entre el proveedor y sus clientes, no es necesario acuerdos sobre descuentos en el precio y cantidades específicas a pedir.

Sin embargo, afirman que todos los clientes deben aceptar una regularidad en realizar pedidos en múltiplos enteros de un período base. Argumentan que la desventaja de esta estrategia, en la vida real, radica en que no todo el tiempo los socios en la cadena podrán respetar sus tiempos de ciclo debido a las fluctuaciones reales de la demanda, y por lo tanto, no asegura del todo que siempre se logra el coste mínimo del sistema.

Viswanathan y Piplani (2001) proponen una estrategia de coordinación de inventarios por medio del uso de la estrategia “*Épocas Comunes de Resurtido*” (ECR), también conocida como “períodos de tiempo”. El análisis lo llevan a dos eslabones en la cadena, considerando el suministro de un producto de un proveedor a varios clientes. Como ya se ha mencionado, la estrategia consiste en que el proveedor realiza una oferta de descuento sobre el precio de adquisición para alentar al cliente aceptar la estrategia ECR, la cual consiste en que el proveedor controle el inventario del cliente y establezca las cantidades y fechas de entrega. Ciertamente, esta práctica reduce la flexibilidad del cliente, y por lo tanto se ve un poco forzado a verificar que el descuento efectivamente compense el incremento en los costes de su inventario.

Más específicamente, Viswanathan y Piplani (2001) modelan la estrategia en el contexto de la teoría de juego de Stackelberg, en donde el proveedor actúa como líder del juego y los clientes como seguidores. De esta manera, el proveedor toma la iniciativa y establece un descuento z_i en el precio de los productos; y propone el período de surtimiento T_0 y el intervalo de tiempo t_i^C para cada cliente i . El seguidor, en este caso los clientes, actúan de acuerdo con la iniciativa del proveedor y toman su propia decisión revisando su política de inventario, aceptando o no el descuento y la estrategia “*Épocas Comunes de Resurtido*”. Los autores suponen que los parámetros de coste y demanda de los clientes son conocidos plenamente por el proveedor, con lo cual,

puede tomar una decisión óptima y anticipar la reacción de los clientes. Consideran determinista y estable (estática) la demanda (D).

Mishra (2004a) extiende el modelo de Viswanathan y Piplani (2001) considerando una política selectiva de descuento. Utilizando la estrategia de Épocas Comunes de Resurtido (ECR). Este autor, diseña un esquema donde combina un sistema de abasto donde participan clientes con acuerdo y sin acuerdo. Entre sus principales resultados, señalan que es factible minimizar el coste del proveedor, seleccionando el descuento y el ECR; establece que, si es necesario, algunos clientes pueden ser excluidos. A este nuevo esquema de organización en el abasto le llaman “*descuento selectivo*”.

Piplani y Viswanathan (2004) extienden su modelo de coordinación de inventarios de la estrategia ECR anterior, pero ahora con múltiples épocas comunes de resurtido (*MCRE, Multiple Common Replenishment Epochs*). Consideran un proveedor que abastece un producto a múltiples clientes, donde el proveedor especifica dos alternativas de épocas comunes de suministro. Los clientes se surten bajo un esquema similar al modelo anterior, pero tienen la libertad de seleccionar una de las dos alternativas ECR. Los autores, demuestran que los beneficios del proveedor bajo la estrategia *MCRE*, puede mejorar considerablemente los beneficios del proveedor comparado con los obtenidos en el modelo original.

Chang y Tsai (2002) desarrollaron un modelo (siguiendo a Viswanathan y Piplani, 2001), con el cual buscan determinar el tamaño de orden óptimo y los mejores períodos de abasto, que minimicen los costes totales del proveedor por el procesamiento de ordenes y de transporte, sujeto a maximizar los costes con los cuales los clientes estarían dispuestos a incurrir. Afirman que en situaciones reales es muy común que el proveedor persiga entregas por lotes grandes para los clientes, circunstancia modelada por estos autores.

Gaytán y Pliego (2002) extienden el trabajo Viswanathan y Piplani (2001). Su investigación proporciona un modelo de optimización para representar el problema en un esquema de coordinación de inventarios *ECR*. Consideran como principales variables de decisión: el número base de períodos entre surtidos y el descuento en el precio de los productos que debe dar el proveedor a cada cliente. Se propone un método heurístico alternativo a la solución exacta que se obtiene al resolver el modelo.

A diferencia de los dos trabajos anteriores, Gaytán y Pliego (2002) consideran que los clientes experimentan una demanda determinista y dinámica. El problema resultante se ubica dentro de los llamados *lot sizing problem*; es decir, se determina el tamaño del lote en un entorno con demanda dinámica pero restringido a realizar el abasto en períodos fijos y a lograr un ahorro $S\%$ sobre el coste óptimo de la política no coordinada de los clientes. Es decir, cada cliente demanda una cantidad conocida y variable de un mismo tipo de producto, durante un horizontes finito de T períodos.

El modelo de Gaytán y Pliego (2002) permite evaluar de manera exacta la estrategia *ECR* en un contexto de demanda variable (dinámica) con paquetes de computo comerciales; sin embargo, debido a que un aumento en la cantidad de clientes m y períodos de análisis T , el número de variables ($3mT + m + 2T - 1$) y restricciones ($3mT + m + T + 1$) aumenta de forma cuadrática en m y T , dichos autores ofrecen la oportunidad de modelar escenarios más complejos por medio de un método heurístico alternativo a la solución exacta del modelo, el cual proporciona soluciones desviadas 1.68% del óptimo. Los beneficios combinados por realizar la coordinación llegan hasta el 39%.

3.4.3 Coordinación entre múltiples proveedores y un cliente

Lau y Lau (1994) formulan un modelo de toma decisiones, y un procedimiento de solución que define la política de pedido de menor coste, para el caso de una empresa (cliente) que abastece un producto por medio de dos proveedores (1 y 2), los cuales ofrecen precios, niveles de calidad y ciclos de entrega diferentes; utilizan un sistema de revisión continua para determinar: el tamaño de lote óptimo (Q^*), el punto de reorden (R^*) y la proporción óptima que debe ser ordenada al proveedor 2 ($r2^*$).

El sistema de inventario acepta retrasos en las entregas, y la demanda es especificada como determinista y constate; por su parte, el tiempo de ciclo es considerado estocástico con distribución de probabilidad conocida. El modelo de decisión de estos autores está compuesto por dos partes: la primera, utiliza el modelo clásico ligeramente modificado de Hadley-Whitin de revisión continua (Q, R) para determinar la política óptima de pedido (es decir, Q^* y R^*), cuando es requerido el proveedor 1 (o el proveedor 2).

En la segunda parte, se extiende el modelo de costes de Hadley-Whitin para determinar la política óptima cuando ambos proveedores son requeridos (es decir: Q^* , R^* y $r2^*$). Más específicamente, los autores desarrollan una expresión de coste total como una función del tamaño del pedido, del punto de reorden y la fracción de la cantidad ordenada al proveedor 2.

A partir del análisis de estas tres políticas propuestas (empresa abastecida sólo por el proveedor 1, o sólo por el 2; o cuando ambos abastecen a la empresa), identifican la de menor coste. Los resultados de su ejercicio numérico muestran que, si alguno o ambos proveedores son requeridos, la proporción óptima de reparto de la orden depende de la combinación particular del coste del producto y los parámetros de la demanda (por ejemplo, coste por almacenaje por unidad, coste de manutención por unidad por año, desviación estándar del tiempo de ciclo, etc.). En general, el procedimiento diseñado por estos autores, fácilmente puede identificar la política óptima de alguna combinación dada de los parámetros.

Kim, *et al.* (2002) considera una cadena de suministro formada por varios proveedores que abastecen a un fabricante de materia prima y/o componentes para producir diferentes tipos de productos. Los autores formulan y resuelven un modelo matemático para encontrar las cantidades de materias primas y/o partes que se debe ordenar a cada proveedor, considerando los límites de capacidad de los proveedores y del fabricante.

3.4.4 Coordinación entre más de dos eslabones de la cadena de suministro

De manera breve, Johnson y Pyke (1999) reportan que existen algunos modelos de gestión de inventarios que pueden identificar los ahorros potenciales, por el solo hecho de compartir información con los socios comerciales (ver, Lee y Nahmias, 1993). Sin embargo, afirman también que modelos más complejos son necesarios para coordinar múltiples empresas ubicadas en diferentes sitios. En este sentido, señalan que no hace mucho tiempo la teoría de inventarios multi-eslabón capturó la atención por parte de los investigadores en el área de la gestión de la cadena de suministro.

No obstante, reconocen que dichos modelos están limitados para ejercer una mejor gestión de la cadena entera, debido a que confrontan problemas con múltiples

empresas, cada uno con su propio sistema para la toma de decisiones y con sus objetivos específicos. Para atender esta situación, trabajos como los desarrollados por Silver, *et al.* (1998) y Graves, *et al.* (1993) ya tratan el tema desde un punto vista más integral. Davis (1993) y Fisher, *et al.* (1994) se orientan a la gestión de inventarios y pronóstico. Otros autores han construido modelos con un enfoque sobre la coordinación de inventarios con más de un eslabón, como son los que se describen a continuación.

Munson y Rosenblatt (2001) sugieren un mecanismo por medio del cual una compañía puede coordinar sus funciones de adquisición y producción. Crean un plan integrado que determina el tamaño de la orden y del lote de producción a través de tres miembros de la cadena. Específicamente, el modelo determina el tamaño del lote para obtener un descuento de su proveedor y ofrecer uno diferente a sus clientes. Busca coordinar los inventarios en una cadena de suministro de tres eslabones (un proveedor, un fabricante y un detallista), y explorar los beneficios por utilizar una política de descuentos en los precios para reducir los costes totales en ambos lados de la cadena. Demuestran que los descuentos aplicados en ambos lados de la cadena, permiten una reducción significativa de los costes en comparación con el caso de concentrarse sólo en los eslabones “*río abajo*”.

Mishra (2004b) extiende el trabajo anterior para buscar compartir ingresos entre los miembros de la cadena. Demuestra cómo tres miembros de la cadena de suministro pueden coordinarse para aumentar los beneficios del canal con decisiones de precio y tamaño del pedido. Desarrolla expresiones matemáticas para los siguientes mecanismos de coordinación: precios, descuento por volúmenes, compartiendo ingresos, y la combinación entre ellos. Consideran la demanda constante, y tiene como objetivo, minimizar el coste.

Khouja (2003) formula un modelo de gestión de inventarios para tres eslabones de una cadena de suministro no secuencial (un proveedor, múltiples fabricantes y múltiples detallistas). Formula los modelos correspondientes para evaluar tres mecanismos de coordinación de inventarios bajo la estrategia *justo a tiempo*. Determina los costes totales y el tiempo de ciclo de resurtido para cada uno de los miembros de la cadena.

El mecanismo más simple, y primero que utiliza, es igualando el tiempo de ciclo de todas las empresas en la cadena de suministro. El segundo, se refiere a que el tiempo

de ciclo en cada eslabón en la cadena es un entero múltiplo del tiempo de ciclo del eslabón adyacente “*río abajo*”. El tercero, se refiere a que el tiempo de ciclo de cada empresa es un múltiplo de una potencia entera de base dos del tiempo de ciclo básico.

Para cada mecanismo de coordinación, de manera secuencial, el autor determina un modelo que calcula el coste total anual del inventario para cada empresa ubicada en cada eslabón, los cuales derivan en el tiempo de ciclo óptimo. Las variables principales que intervienen en la formulación de dichos modelos son: demanda anual, tasa de producción anual, costes por ordenar y costes por almacenaje.

3.4.5 Características principales de los modelos de coordinación de inventarios

En el cuadro 3.1 se muestra un resumen de las características más relevantes de algunos de los modelos de coordinación de inventarios revisados, organizados por orden cronológico.

En dicho cuadro, se observa que la mayoría de los documentos mencionados tratan la demanda como un elemento constante, con algunas excepciones puntuales (por ejemplo, Gaytán y Pliego, 2002 y Robinson y Lawrence, 2004). Del mismo modo, en lo que se refiere al número de productos o artículos que se intercambian en las relaciones comerciales entre los eslabones de la cadena de suministro, se observa poca variación, y solamente dos (Dong y Xu, 2002 y Robinson y Lawrence, 2004) atienden el problema desde el punto de vista multi-producto.

Por lo que respecta al horizonte de planeación, la mayor parte de los primeros modelos de coordinación de inventarios (basados en el modelo de lote económico), se enfocan a atender el control de inventarios sin algún tipo de restricción en el tiempo, es decir, son utilizados de manera infinita en cada período.

Por su parte, los modelos más recientes consideran la planeación finita como un elemento de análisis más dinámico, es decir, plantean un número N de períodos fijos para llevar a cabo el análisis del comportamiento de los inventarios en el tiempo, con énfasis en la toma de decisiones estratégicas.

En este mismo contexto, una parte importante de publicaciones revisadas consideran el valor del precio de los productos o mercancías como un parámetro (una constante);

para otras, este factor es un mecanismos utilizado para lograr la coordinación, y como tal, es considerado como una variable a determinar, ya sea para el caso de aplicar una política de descuentos por volumen, o para inducir a aceptar ciertas condiciones operativas de abastecimiento.

Cuadro 3.1
Características principales de los modelos de coordinación de inventarios

	Autor	Año	Demanda	Producto	Eslabones	Horizonte de planeación	Precio del producto	Estrategia	Control del canal
1	Goyal, S.K.	1976	Determinista Constante	Un producto	Un proveedor Un cliente	Infinito	Constante	DCO	Proveedor
2	Monahan	1984	Determinista Constante	Un producto	Un proveedor Un cliente	Infinito	Constante	DCO	Proveedor
3	Banerjee, A.	1986	Determinista Constante	Un producto	Un proveedor Un cliente	Infinito	Constante	DCO	N. A.
4	Lee y Rosenbantt	1986	Determinista Constante	Un producto	Un proveedor Un cliente	Infinito	Constante	DCO	Proveedor
5	Goyal, S. K.	1988	Determinista Constante	Un producto	Un proveedor Un cliente	Infinito	Constante	DCO	N. A.
6	Goyal y Gupta	1988	Determinista Constante	Un producto	Un proveedor Un cliente	Infinito	Variable	DCO	Proveedor
7	Lau y Lau	1994	Determinista Constante	Un producto	Dos proveedores Un cliente	Infinito	Constante	DCO	N. A.
8	Hill, R M.	1999	Determinista Constante	Un producto	Un proveedor Un cliente	Finito	Constante	DCO	N. A.
9	Dong, <i>et. al.</i>	2001	Determinista Constante	Un producto	Un proveedor Un cliente	Finito	Constante	ER y CR	Cliente o Proveedor
10	Munson y Rosenblatt	2001	Determinista Constante	Un producto	Un proveedor Un fabricante Un distribuidor	Finito	Variable	Descuento en precio	Fabricante
11	Viswanathan y Piplani	2001	Determinista Constante	Un producto	Un proveedor Varios clientes	Infinito	Variable	ECR	Cliente
12	Dong y Xu	2002	Determinista Constante	Multi-producto	Un proveedor Un cliente	Finito Infinito	Variable	VMI	Cliente
13	Klasterin, <i>et. al.</i>	2002	Determinista Constante	Un producto	Un fabricante Un distribuidor	Infinito	Variable	Justo a tiempo	Proveedor
14	Kim, <i>et. al.</i>	2002	Estocástica Impredecible	Un producto	Un fabricante Un proveedor	Finito	Constante	DCO	Fabricante
15	Chang y Tsai	2002	Determinista Constante	Un producto	Un proveedor Varios clientes	Infinito	Variable	ECR	Cliente
16	Gaytán y Pliego	2002	Determinista Dinámica	Un producto	Un proveedor Varios clientes	Finito	Variable	ECR	Cliente
17	Braglia y Zavarella	2003	Determinista Estocástica Constante	Un producto	Un proveedor Un cliente	Finito	Constante	VMI	Cliente
18	Khouja, Moutaz	2003	Determinista Constante	Un producto	Un proveedor Varios fabricantes Varios distribuidores	Finito	Constante	Justo a tiempo	Cliente
19	Chan y Kingsman	2003	Determinista Dinámica	Un producto	Un proveedor Varios clientes	Finito	Constante	Justo a tiempo	N. A.
20	Chan, Chi Kim	2003	Determinista Constante	Un producto	Un proveedor Varios clientes	Finito	Constante	DCO	N. A.
21	Mishra, Ajay K.	2004a	Determinista Constante	Un producto	Un proveedor Varios clientes	Infinito	Variable	Descuento en precio	Fabricante
22	Mishra, Ajay K.	2004b	Determinista Constante	Un producto	Un fabricante Un distribuidor Un detallista	Finito	Variable	Descuento en precio	Fabricante
23	Robinson y Lawrence	2004	Determinista Dinámica	Multi-producto	Un fabricante Un distribuidor Varios clientes	Finito	Constante	Justo a tiempo	N. A.
24	Piplani y Viswanathan	2004	Determinista Constante	Un producto	Un proveedor Varios clientes	Finito	Variable	ECR	Proveedor

Nota: *DCO*: Desarrollo Conjunto de Ordenes; *RE*: Reaprovisionamiento Eficiente; *CR*: Reaprovisionamiento Continuo; *VMI*: Inventario Administrado por el Proveedor; *ECR*: Épocas Comunes de Resurtido; N.A. No aplica.

Finalmente, como se observó, los investigadores que tratan este importante tema de la coordinación de inventarios, llevan a cabo los estudios en diversos contextos de análisis, vertidos en estrategias de coordinación, planteadas a partir de algún tipo de visión (proveedor, cliente o ambos). En general, puede establecerse que las estrategias adoptadas para el control y gestión de inventarios no parecen seguir un patrón específico; en cambio, puede observarse que han surgido líneas de investigación que pueden ser ampliamente extendidas.

3.5 Modelos de coordinación de inventarios considerando las variables fundamentales del transporte

El estudio de la coordinación multieslabón cliente-proveedor ha logrado captar una significativa atención (Goyal, 1976; Banerjee, 1986; Goyal, 1988; Goyal y Gupta, 1989; Woo, *et al*, 2001; Dong y Xu, 2002; Li, *et al*, 1996; Hill, 1997 y 1999; Klastorin, *et al*, 2002; Kim, *et al*, 2002; Munson y Rosenblatt, 2001; Khouja, 2003; Viswanathan y Piplani, 2001; Piplani y Viswanathan, 2004; Gaytán y Pliego, 2002; etc.); sin embargo, la mayor parte de esta literatura no incluye explícitamente algún tipo de relación logística o de asociación con el transporte. Carter y Ferrin (1995) apuntan que la coordinación proveedor-cliente posiblemente no podrá optimizar sus beneficios sin involucrar a los transportistas. Por esta razón, de manera paulatina, en años recientes algunos investigadores han considerado ya las variables fundamentales del transporte en el estudio de la coordinación de inventarios.

En general, los investigadores que tratan el tema de la gestión de inventarios, que involucran aspectos de la operación del transporte, los han dado por llamar “Problema conjunto de inventario-transporte” (*JTIP: Joint Transportation-and-Inventory Problems*). Precisamente Ward y Zhai (2004) presentan una revisión de los artículos que atienden este tema, en donde reportan que existen siete categorías de problemas de este tipo, como son:

(1) El problema de ruteo-inventario (*IRP, Inventory-Routing Problem*) y (2) *IRPSF (Inventory-Routing Problem with Satellite Facilities)* con instalaciones satelitales, son los dos problemas clásicos estudiados por algunos investigadores. En estos, se analizan las actividades tácticas del sistema logístico, por ejemplo, determinación del ruteo de una flota vehicular para visitar a los clientes, decidiendo el período y tamaño de lote de entrega para cada uno de ellos. (3) Los problemas

estratégicos de ruteo-inventario (*SIRP: Strategic Inventory-Routing Problem*), atiende cuestiones relacionadas con decisiones de planeación de recursos, por ejemplo, el objetivo de minimizar el tamaño (o coste) de la flota vehicular requerida para el transporte de los productos. (4) El problema de ruteo-vehicular (*VPR: Vehicle-Routing Problem*), el cual estrictamente hablando, no es un problema *JTIP*, pero es un tópico con una larga historia que, en ese sentido, conjunta las etapas para un *JTIP*. (5) El problema de envío-ruteo (*SRP: Ship-Routing Problem*), el cual puede verse como un programa multi-depósitos *JTIP*, involucra el diseño de un conjunto de rutas para una flota con pedidos heterogéneos atendiendo un conjunto de centros de producción y consumo de un producto. Las cantidades cargadas y despachadas son determinadas, por la tasa de producción y consumo de cada uno de los centros, en función del nivel de inventario. (6) El problema de localización de inventarios (*IAP: Inventory-Allocation Problem*), asume que las rutas viajadas por los vehículos son predeterminadas y trata sobre cómo localizar el inventario en los clientes. (7) El problema de entrega-despacho (*DDP: Delivery-Dispatching Problem*), involucra la asignación de los vehículos a los itinerarios, por ejemplo, conjunto predeterminado de clientes con cantidades fijas de entrega al menor coste.

En términos generales, los tipos de problemas antes señalados, en su gran mayoría están más enfocados al diseño de rutas de transporte y la determinación del tamaño del lote de distribución en un contexto multieslabón, es decir, tratan el tema en el contexto de un proveedor que atiende múltiples clientes por medio de una flota vehicular para el caso unimodal; por lo tanto, puede observarse que no atienden el problema de la gestión misma de los inventarios y su coordinación en el abasto, y más aún, no se evalúa la influencia directa del transporte y sus posibles combinaciones (transporte multimodal). En otras palabras, se detecta que las decisiones de la función transporte siguen siendo predeterminadas.

En esta sección se describen algunos de los pocos artículos más recientes que tratan el tema de la coordinación de inventarios entre cliente-proveedor, que involucran aspectos relacionados con las variables fundamentales del transporte. Los modelos son clasificados por el tipo de estructura de la cadena de suministro que analizan. En este sentido, se identificaron dos categorías: *i*) la estructura básica de un proveedor y un

cliente, y *ii*) la coordinación entre un proveedor y varios clientes; esta última, en el contexto del diseño de la cadena de suministro.

3.5.1. Coordinación entre un proveedor y un cliente

Un primer procedimiento utilizado en la práctica es conocido como “Algoritmo Heurístico de Transporte”. Este algoritmo estudia el impacto de la selección del modo de transporte en el nivel del inventario, y considera al coste y tiempo promedio del traslado y su variabilidad, como los parámetros relevantes del transporte: (Villarreal, 2005).

Este algoritmo, propuesto por Constable y Whybark (1978) establece que, contrariamente a las políticas de inventarios, que asumen fijos los parámetros relevantes del transporte, acepta que las variaciones en los costes de transporte y en el tiempo de entrega, influyen de manera significativa en el inventario de seguridad y en el tamaño del pedido. Lo anterior, de acuerdo con estos autores, se debe a que involucran diferentes opciones o modos de transporte que presentan variaciones importantes entre sí.

El modelo, determina la alternativa de transporte y los parámetros de inventario de manera conjunta (*punto de reorden y cantidad a ordenar*). La clave de este algoritmo se basa en la formulación del problema de inventario incluyendo como variable el tiempo de transporte.

Los parámetros y variables utilizados son los siguientes:

C_t = Coste unitario de transporte

C_i = Coste anual de mantener un dólar en inventario en tránsito

C_o = Coste de ordenar

C_r = Coste de mantener un dólar en inventario

C_s = Coste unitario de escasez (*backorder*)

D = Demanda anual promedio

v = Coste del producto antes de transportarlo

τ = Tiempo de entrega promedio

u = Demanda durante tiempo de entrega

$\mu_u =$ La media conjunta de demanda durante tiempo de respuesta

$P_r(u) =$ Función de distribución de probabilidad de la demanda durante el tiempo de entrega

$q =$ Cantidad a ordenar

$r =$ Punto de reorden

Específicamente, se define que el coste total anual (TC) puede representarse por la siguiente expresión:

$$TC = C_i D + C_i v \tau D + C_o D/q + C_r (r - u + q/2)(v + C_r) + C_s (D/q) \cdot \sum (u - r) P_r(u) \quad (3a.1)$$

La cantidad q , que optimiza TC , se obtiene mediante la solución iterativa de la siguiente función, basada en r y en los parámetros de transporte τ , C_i y $P_r(u)$.

$$q = \left\{ 2 [C_o D + C_s D \cdot \sum (u - r) P_r(u)] / C_r (v + C_i) \right\}^{0.5} \quad (3a.2)$$

El procedimiento de aplicación del algoritmo consiste de tres fases principales:

Fase I. Seleccionar una opción de transporte y estimar los valores óptimos de q y r .

Fase II. Utilizar q y r para determinar el coste total anual asociado con el resto de las opciones de transporte. Seleccionar la alternativa con el menor coste.

Fase III. Re-estimar los valores óptimos de q y r para la opción de transporte óptima si es diferente a la previamente seleccionada.

Se asume que el tiempo de respuesta y la demanda diaria se distribuyen normalmente. La media y varianza de la distribución conjunta de la demanda y el tiempo de respuesta están definidos por:

$$u = \mu_d \tau \quad (3a.3)$$

$$\sigma_u^2 = \tau \sigma_u^2 \sigma_d^2 + \mu_d^2 \sigma_\tau^2 \quad (3a.4)$$

Aplicando el algoritmo, Villarreal (2005) señala que es muy favorable para obtener la solución óptima siempre con menor tiempo. Afirma que la solución óptima de la mayoría de los problemas, involucran la alternativa de transporte con el mínimo

coste. El ratio del coste unitario de transporte/coste del artículo, es un indicador valioso para determinar si las decisiones de transporte e inventario se hacen por separado. Si es alto se separan.

Este algoritmo tiene la ventaja de ser un procedimiento muy sencillo y fácil de aplicar, con la “desventaja” de tener que conocer la distribución de densidad de la demanda y los tiempos de entrega. Por otro lado, aún cuando combina diferentes opciones de transporte, el análisis concluye en la elección de un modo. Es decir, no lleva a un análisis de la combinación modal.

Por su parte, van Eijs (1994) lleva a acabo un análisis sobre dos eslabones de una cadena de suministro, un cliente y un proveedor. Plantea que el cliente compra una familia de N artículos al proveedor y los almacena en un sitio. Los inventarios son revisados periódicamente. En cada período de revisión el cliente puede lanzar una orden de uno o más artículos que llegará L unidades de tiempo después (considerando a L como una constante). Las demandas del artículo i en los períodos subsecuentes son consideradas independientes e idénticamente distribuidas de manera aleatoria con media μ_i y varianza σ_i^2 .

El proceso de la demanda, para todos los artículos, se supone independiente de los demás. Establece como objetivo: minimizar el coste total promedio por unidad de tiempo, sujeto a la restricción de cumplir con un nivel de servicio predeterminado. Las fuentes del coste están dadas por la acción de ordenar, almacenar, así como del coste del producto y su transporte. Considera un coste por inventario disponible (h_i) del artículo (i) por unidad de tiempo, y un coste fijo (a_i), si el artículo i está incluido en el pedido.

Se cuenta con dos opciones para transportar los artículos desde el extranjero hasta el almacén central. La primera opción se refiere a llevar productos en “*contenedor completo*” (FCL), para el cual se carga un coste fijo F por transportar los productos, sin importar el tipo ni la cantidad de cada artículo. La segunda opción es transportar los productos en “*contenedor consolidado*” (LCL), a un coste totalmente variable: c_L incurrido por m^3 utilizando del contenedor. Para $K m^3$ de capacidad del contenedor, resultan economías de escala cuando $Kc_L > F$, como ya ha sido mencionado.

Dicho autor considera una política de inventario del tipo (R, S) con surtido conjunto y decisiones de transporte, utilizando los siguientes pasos:

1. Dado el período de revisión R , calcular el nivel óptimo S_i (ordenar hasta este nivel) de cada artículo utilizando el método de De Kok.
2. En cada período de revisión, de acuerdo con la política (R, S) del paso 1, la composición de la orden es determinada a través de procedimientos de optimización de una etapa, el cual incorpora la explotación potencial de las economías de escala en los costes de transporte.

A partir este escenario, van Eijs (1994) propone un modelo de optimización para resolver el problema de ordenes conjuntas incluyendo decisiones de transporte. En el período de revisión, las cantidades a ordenar del artículo i , son obtenidas por los parámetros de la política básica (R, S) . Si I_i denota la posición del inventario del artículo i , entonces la cantidad a ordenar al inicio está dada por $q_i = \max\{0, S_i - I_i\}$. El problema para el cliente será decidir si las cantidades a ordenar denotadas por el vector $Q = \{q_1, \dots, q_N\}$ tienen que ser aumentadas con un vector de $E = (e_1, \dots, e_N)$ unidades, para tomar ventaja del menor coste por usar la carga completa del contenedor. La decisión de aumentar las cantidades a ordenar no sólo afectan los costes por ordenar, transportar y almacenar en el período actual, sino también en períodos futuros, ya que la posición del inventario en el siguiente período de revisión dependerá del aumento de la cantidad del período actual de revisión. Considérese las siguientes variables:

$\Delta C_1(Q, e)$: Suma de los costes extras totales esperados por ordenar y mantener inventario cuando en el período actual de revisión se ordenan $Q + E$ en lugar de Q .

$\Delta C_2(Q, e)$: Coste total esperado ahorrado en transporte cuando en el período actual de revisión se ordena $Q + E$ en lugar de Q .

El modelo de optimización no lineal es el siguiente:

$$\min_E \{ \Delta C_1(Q, e) - \Delta C_2(Q, e) \} \tag{3a.5}$$

Sujeto a:

$$\sum_{i=1}^N (q_i + e_i) w_i \leq K \quad (3a.6)$$

$$\sum_{i=1}^N (q_i + e_i) w_i \geq \frac{F}{c_L} \quad (3a.7)$$

$$I'_i + q_i \leq I_i + e_i \leq UB_i \quad i = 1, \dots, N \quad (3a.8)$$

La condición (3a.6) indica que el volumen del pedido no debe rebasar la capacidad del contenedor, la condición (3a.7) establece que el volumen total debe exceder el punto de inflexión F/c_L para obtener ahorros en el transporte. Finalmente la condición (3a.8) permite al tomador de decisiones evadir grandes desviaciones de la política de control de inventarios básica, especificando una cota superior UB_i en la posición del inventario del artículo i justo después del resurtido.

El problema no lineal anteriormente propuesto, puede resolverse con técnicas de programación dinámica estándar, sin embargo, debido al gran tamaño que puede tener un problema de este tipo, el autor diseña un algoritmo heurístico para acceder a la solución.

El estudio numérico de aplicación lo lleva a cabo por medio de la comparación de los resultados sin, y con la estrategia de pedidos conjuntos y decisiones de transporte a diversos casos planteados. El resultado del ejemplo numérico mostró que los ahorros disminuyeron en alrededor del 20% en caso de que los planes de pedidos y de transporte estén integrados.

Hoque y Goyal (2000) desarrollan una política óptima de integración del sistema de producción-inventario entre un proveedor y un cliente, teniendo en cuenta restricciones de capacidad del equipo de transporte. Asumen una tasa de demanda determinista y constante en un horizonte de tiempo infinito, el lote de producción puede enviarse en ordenes de igual y/o diferente tamaño. Se incurre en un coste de transporte por cada envío. No se permiten faltantes. Los tiempos de transporte y de preparación de una nueva corrida de producción se consideran insignificantes, y por lo tanto son ignorados. El coste unitario de almacenamiento representa el coste de almacenar una pieza del inventario físico del producto. Coste de preparación de una nueva corrida de producción, el coste unitario de almacenamiento para el proveedor y el cliente, los

costes de un envío desde el proveedor hasta el cliente, y la capacidad de transporte son conocidos. El costo de preparación a la fabricación está dado por $(D/Q)A_V$ y el de ordenar por $(D/Q)mA_B$. El objetivo es minimizar los costes anuales conjuntos incurridos por el cliente y el proveedor, por medio del siguiente modelo de optimización:

$$\text{Minimizar } \frac{B}{Q} + \frac{mb}{Q} + AQ + Q \left[\frac{a}{f(m,e)} + \frac{h_B - h_V (k^{2e} - 1)/(k^2 - 1) + (m - e)k^{2(e-1)}}{2\{(k^e - 1)/(k - 1) + (m - e)k^{(e-1)}\}^2} \right] \quad (3a.9)$$

$$\text{Sujeto a: } e - \sum_{r=0}^{e-1} k^r \leq m^r - \frac{Q}{g} \quad (3a.10)$$

Con $f(m, e) = (m - e)k^{e-1} + \sum_{r=0}^{e-1} k^r$ y

$$B = DA_V, b = DA_B, A = (Dh_V / 2)(1 / D - 1) \text{ y } a = Dh_V / P$$

Donde:

A_V = Coste de preparación de una nueva corrida de producción

A_B = Coste de un envío del proveedor al cliente

h_V = Coste de almacenamiento por unidad incurrido por el proveedor

h_B = Coste de almacenamiento por unidad incurrido por el cliente

D = Demanda por año

P = Tasa de producción

k = Ratio de la tasa de producción contra la demanda

g = Capacidad del equipo de transporte

z = Tamaño del lote más pequeño

Q = Tamaño de la orden

m = Número total de embarques (m es un entero positivo)

e = Número de lotes de tamaño diferente (e es un entero positivo)

C = Coste total anual del sistema integrado

El proveedor transporta la orden Q , completa m envíos en la cual, $e - 1$ son diferentes, y $m + 1 - e$ son iguales. Se asume que $P > D$ y $h_B > h_V$.

A partir de la solución del modelo anterior, Hoque y Goyal (2000) establecen una serie de propiedades que la solución óptima debe satisfacer. Con la ayuda de dichas

propiedades se construye un algoritmo con el cual, determinan la política óptima de integración del sistema de producción-inventario entre un proveedor y un cliente.

Lei, *et al.* (2003) desarrollan un modelo muy interesante para estudiar las relaciones de colaboración entre el trinomio proveedor-transportista-cliente. El planteamiento del problema es establecido en un ambiente donde existe un proveedor que abastece un producto a sólo un cliente, e involucran a un “tercera parte logístico” (3PL-transportista), con funciones de coste cóncavas. Consideran que al adquirir el producto del proveedor, el cliente incurre en un coste fijo por ordenar y en costes por manutención del inventario resultante. El proveedor controla el precio de venta al cliente, paga el coste de envío de cada orden lanzada en el sitio del cliente, y los costes de almacenaje del inventario requerido para garantizar el suministro continuo al cliente. El transportista aplica al proveedor una tasa de envío (tarifa), y es el responsable de trasladar el producto desde proveedor hasta el cliente, e incurre en sus propios costes de operación, $a + bQ$ por envío, donde el parámetro “ a ” representa el coste fijo por envío (por ejemplo, seguro de la carga por viaje, coste del operador, coste kilómetro, depreciación, etc.), y el parámetro “ b ” representa el coste variable por unidad de envío. La demanda de mercado $D(x)$, se asume que es una función decreciente convexa del precio del cliente (x), es decir, $D(x) = d/x^e$ donde $e > 1$ representa el índice de elasticidad del precio y $d > 0$ representa un escalar.

Bajo estos supuestos, Lei, *et al.* (2003) desarrollaron un modelo para cuantificar la rentabilidad de las mejoras en la cadena de suministro. Dichas mejoras buscan aumentar la cooperación y tener una rápida estimación del presupuesto; así como conocer los beneficios a compartir o las cantidades de descuento que se ofrecerá a los socios comerciales en el proceso de negociación.

Se asume que los costes de operación en el que incurren todos los socios, incluido los costes fijos por ordenar y almacenar (unidades por año), son conocidos.

La nomenclatura utilizada se describe a continuación:

x = Precio unitario de venta del cliente (o distribuidor) en el mercado (como variable de decisión del cliente)

- $p =$ Precio unitario de adquisición del cliente ($p < x$) del proveedor (como variable de decisión del proveedor)
- $c =$ Coste variable del proveedor por fabricar ($c < p$)
- $A_B =$ Coste fijo del cliente por ordenar
- $A_V =$ Coste fijo y de procesamiento por orden del proveedor
- $a =$ Coste fijo del transportista por embarque (o por orden)
- $b =$ Coste unitario de transporte
- $h_B =$ Coste unitario de almacenamiento por año, en el que incurre el cliente
- $h_V =$ Coste unitario de almacenamiento por año, en el que incurre el proveedor
- $Q =$ Tamaño del lote del cliente (o la cantidad embarcada) por orden (como variable de decisión del cliente)
- $g =$ Tasa promedio (tarifa) del transportista (como variable de decisión del transportista), y $g > b + a/Q$ donde el coste de operación del transportista por cada pedido se asume como $a > bQ$
- $D(x) =$ Demanda anual del mercado, como una función convexa decreciente de x ,
 $D(x) = d/x^e$, donde d es el factor escalar (> 0) y e es el índice de elasticidad del precio (> 1).

Lei, *et al.* (2003) asumen que el proceso de suministro es *libre a bordo* (FOB), el cual indica que los costes de envío son pagados por el proveedor, y que el precio de venta del proveedor (p) al cliente debe cubrir sus costes de producción (c), el coste fijo promedio por unidad, y los costes de envío (g). Esto significa que debe cumplir $c + g < p < x$. El proceso de suministro subyacente, es mostrado en la figura 3.4.



Figura 3.4
Cadena de suministro proveedor-transportista-cliente

Fuente: Lei, *et al.* (2003).

Con estos supuestos, los autores determinan que la función de beneficio de cada uno de los eslabones de la cadena están dados por:

Beneficios del proveedor en función de su precio de venta:

$$\Pi_V(p) = (p - c - g)D(x) - A_V D(x) / Q - h_V Q / 2 \quad (3a.11)$$

Beneficios del transportista en función de su tarifa por envío:

$$\Pi_T(g) = gD(x) - (a + bQ)D(x) / Q = (g - b)D(x) - (aD(x) / Q) \quad (3a.12)$$

Beneficios del cliente en función de la cantidad de compra y del precio de venta al público:

$$\Pi_B(x, Q) = (x - p)D(x) - A_B D(x) / Q - h_V Q / 2 \quad (3a.13)$$

A partir de las funciones de beneficio definidas y una demanda con función convexa decreciente sobre el precio de venta x , de tipo $D(x) = d / x^2$, se llevó a cabo el desarrollo de los siguientes dos escenarios:

Escenario 1. Determinación de la política óptima en un ambiente sin coordinación.

Es importante recordar que cada miembro de la cadena de suministro, en una política sin coordinación, tratará de establecer sus condiciones con el propósito de maximizar sus beneficios individuales.

Por lo anterior, un ambiente no coordinado que involucra un proveedor, un cliente y un transportista, es un proceso donde este último decide su tarifa (g) que es aceptada por el proveedor y pagada por el cliente.² El proveedor selecciona su precio p de venta al público para maximizar sus beneficios anuales con conocimiento de que el cliente va actuar para maximizar sus propios beneficios. Para un precio p el cliente tomará decisiones sobre las cantidades que ordenará (Q_B), que minimiza sus costes anuales por ordenar y almacenar; en tal virtud, influye en el precio de venta (x) del mercado que maximiza los beneficios del cliente. Por lo tanto, reemplazando $Q_B = (2A_B D(x) / h_B)^{1/2}$ y $D(x)$ por d / x^2 en la ecuación (3.13), el beneficio anual de cliente está dado por:

² Julie Gentry (1995), en su estudio sobre relaciones de colaboración estratégicas entre clientes y proveedores, se destacó que el 78% de las veces la selección del transportista es decisión de una de las partes, es decir, sólo el 22% toman una decisión conjunta. De la decisión unilateral, 40% son proveedores y el 38% clientes.

$$\Pi_B(x|Q) = \frac{d}{x} - \frac{dp}{x^2} - \frac{[2dA_B h_B]^{1/2}}{x} \quad (3a.14)$$

Los cuales, para un p dado, son maximizados cuando el precio de venta en el mercado es de:

$$x_B = \frac{2dp}{d - [2dA_B h_B]} \quad (3a.15)$$

Con Q_B y x_B definidos, los beneficios anuales del proveedor $\Pi_V(p)$ son recalculados sustituyendo estos valores en la función del beneficio original. Luego, haciendo $\partial \Pi_V / \partial p$ se determina el valor de p como:

$$p = \frac{2(c+g)(d^{1/2} - (2A_B h_B)^{1/2})}{d^{1/2} - \theta(2A_B h_B)^{1/2}} \quad (3a.16)$$

$$\text{Dónde, } \theta = 1 + A_V / A_B + h_V / h_B \quad (3a.17)$$

Similarmente, dado Q_B , x_B y p , y reemplazando en la función de beneficios del transportista se recalcula $\Pi_T(g)$; luego, haciendo $\partial \Pi_T / \partial g$ se obtiene la tarifa óptima del transportista (g_{SC}^*) sin coordinación, determinada por:

$$g_{SC}^* = \frac{2(c+b)[d^{1/2} - \theta(2A_B h_B)^{1/2}]}{d^{1/2} - (\theta + 2a/A_B)(2A_B h_B)^{1/2}} - c \quad (3a.18)$$

Reemplazando g_{SC}^* en (3a.16) se obtiene p_{SC}^* ; y este valor en (3a.15), determina x_{SC}^* , lo cual lleva a los siguientes resultados:

En un negocio no coordinado con función de demanda $D(x) = d/x^2$, el precio de venta óptimo para el cliente (distribuidor), la tarifa de carga óptima para el proveedor y el precio de venta al público está dado por:

$$x_{SC}^* = 8(c+b) \frac{d^{1/2}}{d^{1/2} - (\theta + 2a/A_B)(2A_B h_B)^{1/2}} \quad (3a.19)$$

$$p_{SC}^* = 4(c + b) \frac{d^{1/2} - (2A_B h_B)^{1/2}}{d^{1/2} - (\theta + 2a / A_B)(2A_B h_B)^{1/2}} \quad (3a.20)$$

$$g_{SC}^* = \frac{2(c + b) [d^{1/2} - (1 + A_V / A_B + h_S / h_B)(2A_B h_B)^{1/2}]}{d^{1/2} - (\theta + 2a / A_B)(2A_B h_B)^{1/2}} \quad (3a.21)$$

Los resultados anteriores demostraron que, cuando la magnitud de la demanda del mercado (medida por el factor d) para el producto es suficientemente grande, se tienen que: $p_{SC}^* \approx 4(c + b)$, $x_{SC}^* \approx 2p_{SC}^*$, y $g_{SC}^* \approx 2b + c$.

Sustituyendo los valores óptimos de g_{SC}^* , p_{SC}^* y x_{SC}^* , en $\Pi_B(x/Q)$, $\Pi_V(p)$ y $\Pi_T(g)$, se determinan los beneficios óptimos Π_B^* , Π_V^* y Π_T^* . Puesto que $\theta > 0$, se define que:

$$\Pi_B^* > 2\Pi_V^*, \Pi_V^* > 2\Pi_T^* \quad (3a.22)$$

Es decir, en un ambiente de negocios independientes, para cualquier contrato de adquisición firmado por el proveedor, cliente y el transportista, este último tiene la menor iniciativa para tomar la responsabilidad del desempeño total de la cadena de suministro, lo cual revela la debilidad competitiva en los servicios logísticos de un proceso de negocio no coordinado.

Escenario 2. Determinación de la política óptima en un ambiente coordinado.

En esta sección los autores analizan el impacto en las políticas de los negocios y la coordinación estratégica sobre el total de los beneficios con respecto a los dos diferentes niveles de colaboración entre los socios. Primero, consideran un ambiente parcialmente coordinado donde el cliente y el proveedor cooperan, mientras que dejan al transportista actuar de manera independiente. Luego, plantean un ambiente de total coordinación, donde las tres figuras actúan como si pertenecieran a la misma compañía, y acuerdan compartir los beneficios y no imputar cargos entre sí, excepto del cliente (distribuidor) al consumidor en el mercado. Para cada una de los sub-casos, se desarrolló la política óptima para los socios y se cuantifica la mejora sobre la rentabilidad de la cadena de suministro, asumiendo políticas óptimas que pueden ser completamente ejecutadas.

Un ambiente de coordinación parcial es un proceso donde el cliente y el proveedor comparten beneficios y toman decisiones conjuntas sobre el tamaño de lote (Q_{VB}) y el precio de venta (A_{VB}), que maximizan conjuntamente los beneficios anuales de ambos. El transportista actúa de manera independiente y controla su tarifa (g) que es pagada por el proveedor bajo un acuerdo FOB.

En un ambiente parcialmente coordinado los costes conjuntos por ordenar $A_{VB} = A_V + A_B$ y de almacenamiento $h_{VB} = h_V + h_B$, así como el tamaño de lote económico conjunto, definido por $Q_{VB} = (2A_{VB}D(x)/h_{VB})^{1/2}$, permiten al proveedor y al cliente determinar sus ingresos anuales conjuntos $\Pi_{VB}(x|Q_{VB})$, los cuales son maximizados cuando el precio de venta del producto (x_{VB}) en el mercado es calculado con:

$$x_{VB} = \frac{2d(c+g)}{d - [2dA_{VB}h_{VB}]^{1/2}} \quad (3a.23)$$

Con base en Q_{VB} y x_{VB} , los beneficios anuales del transportista $\Pi_T(g)$ son calculados, y con ello la tarifa óptima que maximiza sus ingresos en un ambiente de coordinación parcial g_{CP}^* con $D(x) = d/x^2$, determinada como:

$$g_{CP}^* = \frac{2(c+b)[d^{1/2} - \omega^{1/2}]}{d^{1/2} - (1+a/A_{VB})\omega^{1/2}} - c \quad (3a.24)$$

con $\omega = 2A_{VB}h_{VB}$

Sustituyendo (g_{CP}^*) en (3a.23), el precio de venta óptimo (x_{CP}^*) en este escenario, está definido por:

$$x_{CP}^* = 4(c+b) \frac{d^{1/2}}{d^{1/2} - (1+a/A_{VB})\omega^{1/2}} \quad (3a.25)$$

Con este resultado, Lei, *et al.* (2003) demuestran que el precio óptimo del mercado (x_{CP}^*) es más bajo que para el caso completamente no coordinado. De hecho definen que:

$$x_{CP}^* < \frac{1}{2} x_{SC}^*, \text{ para } D(x) = d/x^2 \text{ y } A_V / A_B \geq h_V / h_B \quad (3a.26)$$

Señalan que en la práctica, una situación muy común es que el ratio de los costes por ordenar sea mayor o igual a los costes por almacenar ($A_V / A_B \geq h_V / h_B$), especialmente si el proveedor es un fabricante quién tiene que pagar un coste fijo de preparación para cada uno de los clientes, sobre todo, cuando éstos lanzan un pedido. En este caso, los costes de inventario para el mismo producto deben ser similares en el almacén del fabricante y del cliente. Sin embargo, los costes fijos del fabricante (A_V) fácilmente podrían ser cientos o miles de veces más altos que los costes de compra por lanzar un pedido (A_B).

La función decreciente del precio de venta en el mercado, se altera cuando se pasa de un ambiente sin coordinación a otro parcialmente coordinado, la situación se invierte y la demanda del producto aumenta, provocando que el beneficio de los socios comerciales mejore, incluyendo el beneficio de los transportistas, determinado por $\Pi_{T(VB)}^* > 4\Pi_T^*$, cuando $A_V / A_B \geq h_V / h_B$. Esto se debe a un aumento en la demanda por el uso del modelo de tamaño de lote económico conjunto Q_{VB} por parte de los proveedores y clientes. En la práctica, sí el modelo EOQ conjunto es instrumentado, podría ofrecer una fuerte iniciativa al transportista con el cual puede liderar una mejor coordinación y un mejor servicio logístico. Sin embargo, con $\omega = 2A_{VB}h_{VB} > 0$, los beneficios del cliente y del proveedor se encuentran por arriba de los del transportista ($\Pi_{VB}^* > 2\Pi_{T(VB)}^*$). Por lo tanto, en un ambiente parcialmente coordinado, el transportista nuevamente recibe una mínima parte del total de los beneficios.

Considerando que $D(x) = d/x^2$ y con x_{CP}^* , puede corroborarse también que el beneficio total en un escenario parcialmente coordinado, es mayor que para el caso no coordinado, es decir:

$$\Pi_{VB}^* + 2\Pi_{T(VB)}^* > 12/7(\Pi_V^* + \Pi_B^* + \Pi_T^*) \quad (3a.27)$$

Lo anterior, permite deducir que al menos 70% de los beneficios totales anuales aumentan con la política de coordinación parcial en relación a la no coordinada.

Sin embargo, los beneficios anuales pueden ser mayores si el transportista es incorporado también bajo una política de coordinación total, es decir, llevar a cabo alianzas entre los tres socios comerciales para compartir beneficios actuando de manera cooperativa. Así, con los costes totales del sistema por ordenar y almacenar definidos como: $A_J = A_V + A_B + A_T$ y $h_J = h_V + h_B + h_T$ y el tamaño de lote económico conjunto determinado como $Q_J = (2A_J D(x) / h_J)^{1/2}$, se formula la siguiente función de beneficio anual conjunto:

$$\Pi_J(x | Q_J) = (x - c - b) \frac{d}{x^2} \sqrt{2A_J h_J \frac{d}{x^2}} \quad (3a.28)$$

La cual, se maximiza con:

$$\Pi_J^* = \frac{1}{4(c+b)} [d^{1/2} - 2A_J h_J]^{1/2}]^2 \quad (3a.29)$$

Para:
$$x_J^* = \frac{2d(c+d)}{d - [2dA_J h_J]^{1/2}} \quad (3a.30)$$

A partir de lo anterior, se pudo observar que, sí la demanda del mercado se aproxima a una función $D(x) = d/x^2$, y el precio de venta óptimo en el mercado x_J^* que maximiza los beneficios conjuntos de los tres actores (proveedor, cliente (distribuidor) y transportista), es mucho más bajo que el precio x_{CP}^* para un ambiente de coordinación parcial, y con $x_J^* < x_{CP}^*$. Los beneficios para una estrategia totalmente coordinada está definida como:

$$\Pi_J^* > 1(1/3)(\Pi_{VB}^* + 2\Pi_{T(VB)}^*) > 2(2/7)(\Pi_V^* + \Pi_B^* + \Pi_T^*) \quad (3a.31)$$

Lo anterior, establece que, pasar de una coordinación parcial a una totalmente coordinada, se podría tener incrementos potenciales de 1/3.

Una generalización del método anterior, se presenta para cuando $D(x) = d/x^e$, con $e > 1$. Permitiendo determinar el total de los beneficios para cada uno de los escenarios mencionados.

Choi, *et al.* (2004) realizan una investigación similar a la anterior, pero con algunas consideraciones diferentes. El marco de análisis es el mismo, es decir, un proveedor que abastece un producto a un cliente por medio de la contratación de un transportista, pero este último ahora con una función de costes cóncava. El cliente compra producto que es vendido en el mercado. La demanda aún se considera que es sensible al precio de venta, pero se agrega que también es sensible a la calidad del producto que abastece el proveedor (o fabricante). Se establecen las relaciones de dominancia entre la rentabilidad lograda por la coordinación totalmente centralizada y la suma de los beneficios individuales de un ambiente descentralizado, analizando también el efecto de la coordinación con el transportista. Se llevan a cabo algunas propuestas sobre políticas de coordinación conjunta para optimizar el precio de venta al público, el nivel de calidad del producto, y la cantidad de carga movida por el transportista.

Se asume que los costes por ordenar, almacenar, preparar y de inventario (unidades por año) son conocidos por todos los miembros de la cadena. Adicionalmente, se acepta que la demanda es determinista, continua, decreciente con un aumento en el precio de venta x al público, y creciente cuando la calidad q del producto mejora (o también, aumenta conforme los costes del proveedor se incrementan con una mejora en la calidad). Sea $D(x, q)$ una función continua que denota la sensibilidad de la demanda al precio y a la calidad del producto.

Notación agregada:

$q =$ Nivel de calidad del producto ($0 < q < 1$); cuando $q \Rightarrow 1$ el producto es de la más alta calidad en el mercado respectivo

$u =$ Presupuesto sobre la calidad para cada unidad de producto

$T(p) =$ Coste del transportista por unidad enviada (o kilómetro), como una función creciente de p

$g =$ Flete de envío cotizado por el transportista, $g > T(p)$

$k =$ Beneficios del transportista por unidad enviada, como una componente constante de g

$A_T =$ Coste fijo del transportista por orden

$h_T =$ Coste unitario en el que incurre el transportista por almacenamiento de inventario en tránsito por año

$D(x, q) =$ Demanda anual, como una función de x y q

Asumiendo que el proceso es libre abordó (FOB), generalmente el proveedor incluye en su precio de venta: los costes de producción (c), un coste unitario por la calidad del producto (como variable de decisión), el flete de envío, y el margen de su venta, cumpliendo con: $c + u + g < p < x$; donde x , es el precio de venta al público por parte del cliente (distribuidor). Dado estos supuestos, las expresiones a continuación representan los beneficios esperados del proveedor, transportista y el cliente, respectivamente.

$$\text{Proveedor: } \Pi_V(p, q) = (p - c - u - g)D(x, q) - A_V D(x, q) / Q - h_V Q / 2 \quad (3a.32)$$

$$\text{Transportista: } \Pi_T(g) = (g - T(p))D(x, q) - A_T D(x, q) / Q - h_T Q / 2 \quad (3a.33)$$

$$\text{Cliente: } \Pi_B(x, Q) = (x - p)D(x) - A_B D(x) / Q - h_B Q / 2 \quad (3a.34)$$

A partir de estas funciones anuales de beneficio se observa que se optimizan para diferentes tamaños de lote (Q). Los costes de operación del transporte, definidos como una componente de (3a.33), es una función cóncava de la demanda del mercado $D(x, q)$. Dependiendo de la cantidad ordenada para ser enviada en cada período, los costes anuales de operación del transportista pueden ser representados como:

$$T(p) \cdot D(x, q) + \frac{A_T h_i + A_i h_T}{\sqrt{2A_i h_i}} \sqrt{D(x, q)}; \quad i = \text{Proveedor, cliente o transportista} \quad (3a.35)$$

Con lo cual, se minimiza en $T(p) \cdot D(x, q) + h \sqrt{2A_T h_T D(x, q)}$, cuando $i = \text{transportista}$, o cuando la cantidad ordenada en (3a.33) es obtenida igualmente para el *tamaño de lote económico del transportista (ETQ)*, o para:

$$Q = Q_T = \sqrt{2A_T D(x, q) / h_T} \quad (3a.36)$$

Bajo un esquema similar al estudio anterior, Choi, *et al.* (2004) determinan el tamaño de lote económico, y los beneficios individuales del cliente y el proveedor, en función del precio óptimo y calidad del producto. Por su parte, los beneficios del transportista son determinados en función del flete preestablecido. La suma total de los beneficios individuales, proporcionan los beneficios máximos que puede alcanzar el

sistema en un ambiente descentralizado. A partir de una aplicación realizada y el análisis de los resultados obtenidos, se deducen los siguientes aspectos más importantes:

- a) Con el tamaño de lote económico establecido por el cliente $Q_B(p, q)$ y la estructura de costes que presenta el transportista, se dedujo que los beneficios anuales de éste último, nunca podrán ser más grandes que el máximo que puedan lograr con su propia política ETQ : $Q_T(p, q) = \sqrt{2A_T D(x_B^*(p, q), q) / h_T}$.
- b) Con el tamaño de lote económico establecido por el cliente $Q_B(p, q)$, los beneficios del proveedor nunca serán más grandes que el máximo que puedan lograr con su propio EOQ : $Q_S(p, q) = \sqrt{2A_V D(x_B^*(p, q)) / h_V}$.
- c) Con el $Q_V(p, q)$ del proveedor, los beneficios anuales de los clientes nunca serán más grandes que el máximo que puedan lograr bajo su política EOQ : $Q_B(p, q) = \sqrt{2A_B D(x_V^*(p, q), q) / h_B}$.
- d) Con la política del proveedor $Q_V(p, q)$ y la estructura de costes del transportista, los beneficios anuales de éste último nunca serán más grandes que el máximo que puedan lograr con su política óptima EOQ : $Q_T(p, q) = \sqrt{2A_T D(x_{VB}^*(p, q), q) / h_T}$.

Una conclusión contundente de este ejercicio, indica que en un sistema descentralizado (descoordinado), los beneficios totales máximos representan posiblemente la cuota más baja que puede lograr un esquema completamente coordinado.

En un esquema coordinado, Choi, *et al.* (2004) demuestran que los beneficios del transportista pueden ser mejorados, aún en un ambiente descoordinado, si el cliente incorpora en sus decisiones sobre el tamaño de su lote, los costes operativos incurridos por el total de los socios comerciales en la cadena de suministro.

Dado $A_J = A_V + A_B + A_T$, $h_J = h_V + h_B + h_T$ y $Q_J = \sqrt{2A_J D(x, q) / h_J}$, establecen que en un ambiente de negocios descentralizado, para cualquier p, q, g y x , si se cumple las condiciones:

$$\frac{A_S + A_T}{A_B} \geq \frac{h_V + h_T}{h_B} \quad \text{y} \quad (3a.37)$$

$$\frac{A_T}{h_T} \geq \sqrt{\frac{A_B}{h_B} \cdot \frac{A_J}{h_J}} \quad (3a.38)$$

El beneficio del transportista, con una política coordinada, es al menos igual o mayor que los beneficios obtenidos con una política de lote económico establecida por el cliente, es decir:

$$\Pi_T(g | Q_J) \geq \Pi_T(g | Q_B) \quad (3a.39)$$

Choi, *et al.* (2004) señalan que para el caso de la condición (3a.37) es fácil su justificación. Sin embargo, para la condición (3a.38) sólo se cumple para costes fijos del transportista relativamente más altos que los costes fijos del cliente.

A partir de los modelos desarrollados bajo un escenario de coordinación, Choi, *et al.* (2004) establecen los siguientes teoremas:

- a) Relaciones de dominancia. Para un p, q, g y x , el beneficio total de la cadena de suministro bajo un Q_J dominante, la suma de los beneficios anuales máximos de los socios en un ambiente independiente usando el tamaño de lote óptimo del cliente Q_B . Esto es: $\Pi_J(x, p, q | Q_J) \geq \Pi_V + \Pi_T + \Pi_B$
- b) Generalizando la relación de dominancia. Para un p, q, g y x , se tiene que los ingresos totales conjunto serán mayores o iguales que la suma de beneficios individuales ($\Pi_J(x, p, q | Q_J) \geq \Pi_V + \Pi_T + \Pi_B$), a pesar de que el tamaño de lote Q , en un ambiente descentralizado, sea decidido por cualquier miembro de la cadena; dicho de otra manera: $Q = Q_V, Q_B$, o Q_T .
- c) Los beneficios totales de la cadena de suministro bajo el tamaño de lote económico conjunto Q_J , y los ingresos $\Pi_J^*(p)$, aumentan según se reduzca el precio de venta por unidad del proveedor.

- d) Los beneficios totales de la cadena de suministro bajo el tamaño de lote económico conjunto Q_J , y los ingresos $\Pi_J^*(p)$, aumentan cuando el flete (tarifa) de transporte g disminuye.
- e) En un ambiente de coordinación, el precio unitario óptimo de venta del proveedor p_J^* y el precio unitario de transporte g_J^* , cargado al proveedor, está dado por:

$$p_J^* = c + u_J^* + g_J^* + A_v / Q_J + h_v Q_J / [2D(x_J^*, q_J^*)] \quad (3a.40)$$

$$g_J^* = T(p_J^*) + A_T / Q_J + h_T Q_J / [2D/(x_J^*, q_J^*)]; \quad \text{con } k_J^* = 0 \quad (3a.41)$$

Zhao, *et al.* (2004) desarrollaron un modelo donde involucran los costes de transporte en un problema del tipo cliente-proveedor. Asumen que la demanda es estática durante todo el horizonte de planeación. Los productos pueden ser entregados en un tiempo L después de que han sido ordenados; L es llamado el tiempo de ciclo y es un parámetro predeterminado. Además los resurtidos deben ser completados sin incurrir en productos almacenados. Existe un conjunto de vehículos homogéneos con capacidad limitada para entregas. Se asume que los vehículos son rentados a un “tercera parte logístico” (3PL-transportista), cada vez que es necesario entregar productos terminados.

Por lo tanto, dada una demanda (D) por unidad de tiempo (por día) y la cantidad ordenada de productos (Q), el modelo busca minimizar los costes totales promedio (TCU_0) del sistema logístico a lo largo del horizonte de planeación, con el siguiente problema (P1) de optimización:

$$\text{Minimizar } TCU_0 = \frac{A}{Q/D} + \frac{c \cdot Q}{Q/D} + \frac{v_T \cdot b}{Q/D} + \frac{n \cdot a}{Q/D} + \frac{h \cdot Q}{2} \quad (3a.42)$$

$$\text{Sujeto a: } (n-1)k < Q \leq n \cdot k \quad (3a.43)$$

$$v_m \leq U / t \quad (3a.44)$$

$$n \cdot v_m \geq v_T \quad (3a.45)$$

n, v_T, v_m son enteros.

Donde:

TCU_0 = Coste total por unidad de tiempo asociado con el sistema logístico

k = Capacidad de carga de los vehículos

a = Coste fijo (representado éste como el coste de renta más bajo de un vehículo en un día de trabajo, sin importar la distancia viajada)

b = Costes variables de transporte por viaje

U = Duración del trabajo por día

t = Tiempo total de cada viaje

A = Coste de preparación de una orden

h = Coste unitario de inventario por unidad de tiempo

c = Coste unitario de producción

n = Número de vehículos usados para entregar Q

v_T = Número total de viajes de esos vehículos

v_m = Número máximo de viajes que un vehículo es capaz de realizar en un día de trabajo

En general, el nivel más alto de inventario ocurre cuando (Q) es recibido, el cual, después de Q/D períodos de tiempo, la cantidad de inventario se va reduciendo hasta cero.

La restricción (3a.43) especifica el número de viajes terminados por los vehículos para entregar la cantidad ordenada de productos (Q). Debido a que (v_m) en las restricciones (3a.44) y (3a.45) representan el número máximo de viajes que un vehículo es capaz de realizar en un día de trabajo, este puede considerarse como un parámetro predeterminado. Haciendo $n = g(v_T)$, el modelo P1 puede expresarse como:

$$\text{Minimizar } TCU(Q) = \frac{A}{Q/D} + \frac{c \cdot Q}{Q/D} + \frac{(v_T \cdot c) + (k \cdot g(v_T))}{Q/D} + \frac{h \cdot Q}{2} \quad (3a.46)$$

$$\text{Sujeto a: } (v_T - 1)k < Q \leq v_T \cdot k \quad (3a.47)$$

$$g(v_T) = n = \left\lceil \frac{v_T}{v_m} \right\rceil \quad (3a.48)$$

n, v_T, v_m son enteros.

A partir del cual, deducen que el tamaño de lote económico óptimo puede calcularse con:

$$Q_{v_T}^* = \sqrt{\frac{2D(A + b \cdot v_T + a \cdot g(v_T))}{h}} \quad (3a.49)$$

Por lo tanto, Zhao, *et al.* (2004) determinan que el coste total óptimo por unidad de tiempo, asociado con el sistema logístico, involucrando los costes fijos y las variables del transporte, puede determinarse con la siguiente expresión:

$$TCU_{v_T}(Q_{v_T}^*) = \sqrt{2 \cdot D \cdot h \cdot [A + b \cdot v_T + a \cdot g(v_T)]} + c \cdot D \quad (3a.50)$$

Sethi, *et al.* (2005) plantean que la mayoría de las compañías globales tratan con clientes con diferentes niveles de variabilidad de su demanda y habilidades de prevención. Señalan que los clientes con habilidades de previsión superiores, pueden permitirse el lujo de abastecerse de una cantidad importante de su demanda, utilizando modos de entrega lentos, pagando un coste extra sólo para aquellas entregas en modos más rápidos para satisfacer la demanda cuando surge inesperadamente. En cambio, las compañías con demandas irregulares y poca habilidad de previsión, generalmente tienen que pagar por modos de entrega más rápidos para responder a los cambios inesperados en la demanda.

Por lo anterior, afirman que los proveedores han reconocido la importancia de dos aspectos fundamentales: *i)* manejar una cartera de clientes con necesidades diferentes y, *ii)* identificar el valor de conocer por anticipado su demanda. En dicho sentido se piensa que tienen razón, pues con el avance en las tecnologías de la fabricación, los servicios logísticos y la globalización de los mercados, el segundo aspecto parece ser posible.

En este contexto, Sethi, *et al.* (2005) formulan un modelo considerando tres modos de transporte que interactúan con un sistema de inventario de revisión periódica y dos esquemas de pronósticos de actualización de la demanda antes de que ésta se presente. Cada modo de transporte es denotado como rápido, medio y lento. Los pedidos son hechos al inicio de cada período.

Para el modo rápido, sus entregas se realizan al final del mismo período (actual), para el modo medio son entregados al final del siguiente período, y los pedidos por el modo lento, son entregados al término del segundo siguiente período. Es decir, tienen

un tiempo de ciclo de 1, 2 y 3 períodos, respectivamente. En cuanto al coste, las ordenes por el modo más rápido, son más caras que el modo medio, y éste, más caro que el modo lento. Consideran una secuencia de eventos tal y como se describe a continuación:

Al inicio de cada período, se revisa el nivel de existencias o faltantes, y se actualiza el pronóstico de la demanda que se presentará en los siguientes tres períodos, contabilizando el período actual como el primero. Adicionalmente, se conocen las cantidades ordenadas por el modo medio y lento, solicitadas uno y dos períodos antes, respectivamente. Con esta información, las decisiones se toman sin importar las cantidades a pedir por cada modo. El objetivo es tomar las decisiones de las cantidades a ordenar de tal manera que se minimice el coste total sobre el horizonte de planeación. Para describir esta situación, la notación a continuación define los parámetros y variables empleadas para la formulación del modelo:

- $\langle 1, N \rangle = \{1, 2, \dots, N\}$: Períodos de planeación (horizonte de planeación)
- (Ω, F, P) = Espacio de probabilidad
- F_k = Cantidad ordenada por el modo rápido (no-negativa) en el período k
- M_k = Cantidad ordenada por el modo medio (no-negativa) en el período k
- S_k = Cantidad ordenada por el modo lento (no-negativa) en el período k
- $\pi_k^f(u)$ = Coste de la orden rápida, $u \geq 0$ unidades en el período k
- $\pi_k^m(u)$ = Coste de la orden media, $u \geq 0$ unidades en el período k
- $\pi_k^s(u)$ = Coste de la orden lenta, $u \geq 0$ unidades en el período k
- R_k^1 = Primer determinante (variable aleatoria) de la demanda en el período k
- R_k^2 = Segundo determinante (variable aleatoria) de la demanda en el período k
- R_k^3 = Tercer determinante (variable aleatoria) de la demanda en el período k
- D_k = Demanda no-negativa en el período k modelada como una función de $g_k(R_k^1, R_k^2, R_k^3)$
- X_k = Nivel del inventario al inicio del período k
- $Y_k = X_k + M_{k-1} + S_{k-2}$: Posición del inventario al inicio del período k
- X_{N+1} = Nivel del inventario al final del último período del horizonte de planeación
- $H_k(x)$ = Coste del inventario cuando $X_k = x$ en el período k
- $H_{N+1}(x)$ = Coste del inventario cuando $X_{N+1} = x \geq 0$, o coste de penalización cuando $X_{N+1} = x < 0$
- $E[\cdot]$ = Valor esperado definido en el espacio de probabilidad (Ω, F, P)

$E[\cdot] = E[\cdot / \mathfrak{R}] = \text{Valor esperado condicionado a un } \sigma - \text{campo } \mathfrak{R}$

La función objetivo a minimizar es la siguiente:

$$\begin{aligned}
 J_l(x_1, s_{-1}, m_0, s_0, r_1^1, r_1^2, r_2^1, (F, M, S)) = & \\
 & H_1(x_1) + E \left\{ \sum_{l=1}^{N-2} [\pi_l^f(F_l) + \pi_l^m(M_l) + \pi_l^s(S_l) + H_{l+1}(X_{l+1})] \right. \\
 & + [\pi_{N-1}^f(F_{N-1}) + \pi_{N-1}^m(M_{N-1}) + H_N(X_N)] \\
 & \left. + [\pi_N^f(F_N) + H_{N+1}(X_{N+1})] \right\} \quad (3a.51)
 \end{aligned}$$

Donde $(F, M, S) = ((F_1, \dots, F_N), (M_1, \dots, M_{N-1}), (S_1, \dots, S_{N-2}), \dots)$ es una secuencia histórica independiente o decisiones no anticipadas admisibles.

La interpretación de la función anterior busca minimizar el coste del inventario en el período 1, más el valor esperado de las cantidades por los tres modos hace dos períodos, teniendo en cuenta sus respectivos tiempos de entrega (l) y el valor del inventario en el período inmediato siguiente al actual, más el valor esperado de la cantidades pedidas por los modos rápido y medio y el valor del inventario del último período del horizonte de planeación, más el valor esperado de la cantidad pedida por el modo rápido en el período actual y el valor del inventario en el período inmediato siguiente al último del horizonte de planeación.

Para solucionar el modelo, Sethi, *et al.* (2005) proponen un modelo de programación dinámica y una política óptima de Markov. Verifican si el coste de la política de Markov, obtenido de la solución de la programación dinámica, iguala el valor de la función objetivo (3a.51) del problema sobre $\langle 1, N \rangle$ horizonte de planeación o no. La prueba se hace a través de dos teoremas, de los cuales, concluyen que existe una política óptima de Markov que iguala la solución dada de la función objetivo. Así, existe una política del tipo histórico-dependiente, cuyo valor de la función objetivo iguala el valor de la función objetivo (3a.51), por lo que concluyen que existe una política de Markov que provee el mismo valor de la función objetivo, planteada inicialmente. Por lo tanto, la función objetivo se transforma a las siguientes ecuaciones de programación lineal:

$$U_l(x_l, s_{l-2}, m_{l-1}, s_{l-1}, r_l^1, r_l^2, r_{l+1}^1) = H_l(x_l) + \inf_{\substack{F \geq 0 \\ M \geq 0 \\ S \geq 0}} \{ \pi_l^f(F) + \pi_l^m(M) + \pi_l^s(S) \\ + E[U_{l+1}(\psi_{l+1}(F), s_{l-1}, M, S, r_{l+1}^1, R_{l+1}^2, R_{l+2}^1)] \} \quad l = 1, 2, \dots, N-2 \quad (3a.52)$$

$$U_{N-1}(x_{N-1}, s_{N-3}, m_{N-2}, s_{N-2}, r_{N-1}^1, r_{N-1}^2, r_N^1) = H_{N-1}(x_{N-1}) + \inf_{\substack{F \geq 0 \\ M \geq 0}} \{ \pi_{N-1}^f(F) + \pi_{N-1}^m(M) \\ + E[U_N(\psi_N(F), s_{N-2}, M, r_N^1, R_{N1}^2)] \} \quad (3a.53)$$

$$y \quad U_N(x_N, s_{N-2}, m_{N-1}, r_N^1, r_N^2) = H_N(x_N) + \inf_{F \geq 0} \{ \pi_N^f(F) + E[H_{N+1}(\psi_N(F))] \} \quad (3a.54)$$

Donde la notación $\psi_{l+1}(\cdot)$ está definida como:

$$\psi_{l+1}(F) = x_l + s_{l+2} + m_{l+1} + F - g_l(r_l^1, r_l^2, r_l^3), \quad l = 1, \dots, N \quad (3a.55)$$

Y F, M y S son argumentos de minimización en la ecuaciones (3a.52, 3a.53 y 3a.54).

Para un análisis más profundo del problema, se analiza la optimalidad del tipo de política de inventario-base, donde se reemplaza F por $\varphi - y_l$, M por $\mu - (\varphi + s_{l-1})$, y S por $\sigma - \mu$ en las ecuaciones (3a.52) y (3a.54), ahora φ, μ, σ son las posiciones del inventario post-ordenes, después de entregar las cantidades pedidas de cada uno de los tres modos. Con ello, prueban la optimalidad del problema del tipo de política de inventario-base, a través del análisis directo de las restricciones naturales requeridas de los minimizadores de las funciones convexas de costes resultantes de los tres modos de transporte.

Otro problema que se aborda en este trabajo es el del problema del horizonte infinito de planeación: ahora se deja $N = \infty$ y $(F, M, S) = ((F_n, M_n, S_n), (F_{n+1}, M_{n+1}, S_{n+1}), \dots)$. La función objetivo extendida para este problema es:

$$J_n(x_n, s_{n-2}, m_{n-1}, s_{n-1}, r_n^1, r_n^2, r_{n+1}^1, (F, M, S)) = \\ H_n(x_n) + \sum \alpha^{k-n} E[\pi_k^f(F_k) + \pi_k^m(M_k) + \pi_k^s(S_k) + \alpha H_{k+1}(X_{k+1})] \quad (3a.56)$$

Donde α es un valor de descuento dado entre $0 < \alpha < 1$

Ahora, las ecuaciones de programación dinámica para este problema son:

$$U_n(x_n, s_{n-2}, m_{n-1}, s_{n-1}, r_n^1, r_n^2, r_{n+1}^1) = H_n(x_n) + \inf_{\substack{F \geq 0 \\ M \geq 0 \\ S \geq 0}} \{ \pi_n^f(F) + \pi_n^m(M) + \pi_n^s(S) \\ + \alpha E[U_{n+1}(x_n + s_{n+2} + F - g(r_l^1, r_l^2, R_l^3), s_{n-1}, M, S, r_{n-1}^1, R_{n+1}^2, R_{n+2}^1)] \} \quad n = 1, \dots, \quad (3a.57)$$

En seguida prueban la existencia de una solución para la ecuación de programación dinámica (3a.57), con el método de aproximaciones sucesivas del problema de horizonte de planeación infinito a través de problemas grandes de horizontes infinitos.

En un trabajo posterior a éste, aplican los resultados obtenidos a problemas de costes promedios sin actualizar el pronóstico, y desarrollan optimizaciones computacionales, así como procedimientos heurísticos para resolverlos.

Como otros autores, Sethi, *et al.* (2005) sostienen que los modelos de inventarios con más de dos alternativas de entrega no han recibido mucha atención en la literatura. Por ejemplo, señalan que Fukuda (1964) y Zhang (1996) son algunos de los autores que han abordado el tema para el caso de tres modos de suministro. Fukuda (1964) investigó el problema bajo un supuesto artificial en el que los pedidos no pueden ser lanzados solamente en todos los períodos.

Bajo dicho supuesto, este autor demostró que el problema es equivalente al de dos modos de entrega. Zhang (1996) extendió ese trabajo para tres modos de suministro. Decidió minimizar la función de costes como nivel base de existencias para los tres modos de entrega, pero sin restricciones. Utilizó un procedimiento heurístico para estimar sus valores. Sin embargo, Sethi, *et al.* (2005) sostienen que su método no lleva a una política óptima.

Toptal (2003) desarrolla dos modelos en el contexto del problema de coordinación cliente-proveedor para el control de inventarios. En ellos, involucra los costes de transporte (C_T) para determinar su impacto sobre las decisiones de inventario (por ejemplo, Q), asumiendo una demanda determinista y constante, en un horizonte de tiempo infinito bajo un esquema centralizado de decisiones.

El modelo I, desarrolla y resuelve el problema más simple y sólo tiene en cuenta, de manera explícita, la estructura general de los costes del fabricante en el proceso de

abasto (*inbound*) ignorando el coste de entrega. El modelo II, considera ambos costes simultáneamente, esto es, las fases de abasto (*inbound*) y entrega (*outbound*). Es decir, extiende el primer modelo, pero ahora considera al cliente y al proveedor con la misma estructura de costes, involucrando explícitamente los costes o restricciones de transporte en la fase de abasto de ambos actores de la cadena (véase figura 3.5).

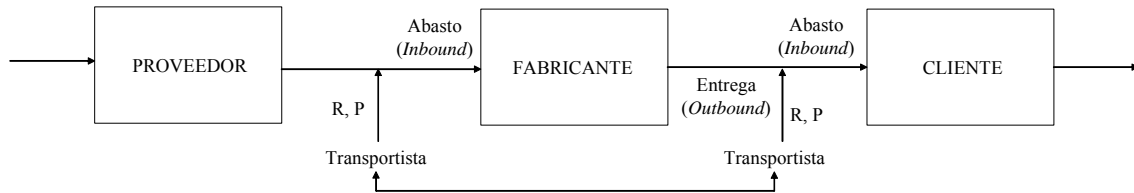


Figura 3.5
Costes de abasto y entrega

Por lo anterior, establece que los costes generalizados de transporte estarán en función de la cantidad abastecida Q , los cuales incluyen un coste fijo a para el abasto/entrega así como un coste variable por camión de carga, es decir:

$$C_T(Q) = a + \left\lceil \frac{Q}{K} \right\rceil R \quad (3a.58)$$

Donde:

$K =$ Capacidad de carga por camión

$R =$ Coste fijo por camión de carga; se incurre si es completo o parcialmente cargado

Si $nQ \geq K$, puede representar una flota, para $n > 1$; ello significa que el coste variable es proporcional al número de camiones utilizados. Por lo tanto, se asume ilimitada la capacidad de transporte.

Los supuestos del problema considerados por Toptal (2003) son esencialmente los mismos que para el modelo clásico de coordinación cliente-proveedor de Goyal (1976), con la excepción de que en este caso, incluye la estructura general del coste de transporte. El coste de resurtido (transporte) del fabricante (C_V) y el cliente (C_B), están dados por:

$$C_V(Q_V) = a_V + \left\lceil \frac{Q_V}{K} \right\rceil R, \text{ y} \quad (3a.59)$$

$$C_b(Q_b) = a_B + \left\lceil \frac{Q_b}{K} \right\rceil R, \text{ respectivamente.} \quad (3a.60)$$

Nótese que las funciones $C_v(\cdot)$ y $C_b(\cdot)$ incluyen los costes de abasto y entrega, representados por los términos $\lceil Q_v / K \rceil / R$ y $\lceil Q_b / K \rceil / R$, respectivamente. En este sentido, asumen que el transportista contratado por el fabricante, administra ambos flujos (véase figura, 3.5). De ahí que el equipo de transporte utilizado sea el mismo, con un coste por camión (R) y capacidad (K).

Por otro lado, también tiene en cuenta los costes por almacenamiento del fabricante y el cliente por unidad por tiempo, denotado por h_v y h_B , respectivamente. El coste de almacenamiento del eslabón es denotado por $h' = h_B - h_v \geq 0$.

Para formular los modelos, Toptal (2003) asume que un fabricante se abastece de su proveedor con grandes lotes y que la tasa de demanda de su cliente es una constante conocida, denotada por D ; el problema consiste en calcular las cantidades a ordenar para el fabricante y el cliente que minimizan los costes totales de sistema. En este contexto, la cantidad ordenada por el fabricante, denotada por Q_v , representa el tamaño del envío para abastecerse desde su proveedor. En tanto, Q_B es el tamaño del lote enviado por el fabricante a su cliente.

La notación utilizada por Toptal (2003) se presenta a continuación:

$A_v =$ Coste fijo de suministro del fabricante

$h_v =$ Coste de manutención de inventario por unidad por tiempo del fabricante

$A_B =$ Coste fijo de suministro del cliente

$h_B =$ Coste de manutención de inventario por unidad por tiempo del cliente

$h' =$ Costes de almacenamiento del eslabón ($h' = h_B - h_v \geq 0$)

$R =$ Coste fijo por camión de carga

$K =$ Capacidad de carga por camión

$D =$ Tasa de demanda del cliente

$Q_v =$ Cantidad abastecida al fabricante; tamaño del lote de abasto

$Q_B =$ Cantidad abastecida al cliente; tamaño del lote de entrega al cliente

$T_V =$ Longitud del ciclo de abasto del fabricante

$T_B =$ Longitud de ciclo de abasto al cliente

$n =$ Número de veces que es abastecido un cliente dentro de un ciclo del fabricante

($T_V = nT_B$ y entonces $Q_B = Q_V / n$)

Toptal (2003) establece que los costes totales anuales del modelo I y II, denotados por $G(n, Q_V)$ y $G'(n, Q_V)$, respectivamente, están dados por:

$$\text{Modelo I: } G(n, Q_V) = C_V(Q_V) \frac{D}{Q_V} + \frac{h_V(n-1)Q_V}{2n} + \frac{nA_B D}{Q_V} + \frac{h_B Q_V}{2n} \quad (3a.61)$$

$$\text{Modelo II: } G'(n, Q_V) = C_V(Q_V) \frac{D}{Q_V} + \frac{h_V(n-1)Q_V}{2n} + nC_B(Q_V/n) \frac{D}{Q_V} + \frac{h_B Q_V}{2n} \quad (3a.62)$$

Nótese que D/Q_V representa el número de abastecimientos por año; los primeros términos de las expresiones anteriores forman el coste anual de suministro y los costes por camión cargado utilizado para el transporte de abasto (*inbound*). El segundo término de ambas expresiones, son los costes de manutención de inventario del fabricante. El tercero y cuarto término, son los costes anuales del abasto por camión y el coste de manutención de inventarios por parte del cliente, respectivamente.

Los modelos I y II, pueden describir como:

$$\text{Modelo I: } G(n, Q_V) = \frac{A_V D}{Q_V} + \left\lceil \frac{Q_V}{K} \right\rceil \frac{RD}{Q_V} + \frac{h_V Q_V}{2} + \frac{nA_B D}{Q_V} + \frac{h' Q_V}{2n} \quad (3a.63)$$

$$\text{Modelo II: } G'(n, Q_V) = \frac{A_V D}{Q_V} + \left\lceil \frac{Q_V}{K} \right\rceil \frac{RD}{Q_V} + \frac{h_V Q_V}{2} + \frac{nA_B D}{Q_V} + \left\lceil \frac{Q_V}{nK} \right\rceil \frac{nRD}{Q_V} + \frac{h' Q_V}{2n} \quad (3a.64)$$

Los problemas en consideración están dados por:

Modelo I	Modelo II
Min $G(n, Q_V)$	Min $G'(n, Q_V)$
Sujeto a: $Q_V \geq 0$	Sujeto a: $G'Q_V \geq 0$
n : entero positivo	n : entero positivo

Para cada uno de los casos, desarrolla un algoritmo heurístico. Luego, utilizando los costes de dicho algoritmo como una cota superior, desarrolla un método exacto de solución.

Toptal (2003) sugiere el desarrollo de modelos donde se consideren límites en la capacidad de transporte, por ejemplo, $\lceil Q_V / K \rceil \leq C_V$ y $\lceil Q_V / nK \rceil \leq C_B$, donde C_V y C_B denotan el número de camiones de carga disponibles para el proveedor y para el cliente. La transformación lineal propuesta de estas restricciones, son:

$$Q_V \leq C_V K \quad \text{y} \quad Q_V \leq n C_B K. \quad (3a.65)$$

Propone también generalizar el caso donde el proveedor tiene múltiples opciones para seleccionar modos de transporte, por ejemplo, diferentes tipos de equipo o diferentes proveedores de servicios de transporte con diferentes costes y capacidad de carga. Seguido de esta consideración, la investigación puede extenderse con múltiples productos o múltiples proveedores.

Reyes y Gaytán (2003) extienden el trabajo desarrollado por Gaytán y Pliego (2002), y formulan un modelo en el cual consideran dos modos de transporte (uno lento y otro rápido) para el abasto de una familia de productos de un proveedor a un cliente. En la función de costes, incluyen el coste del inventario en tránsito que se incurre por el tiempo de transporte de los productos.

A partir de los supuestos propuestos y bajo una política sin coordinación, el modelo de Reyes y Gaytán (2003) determina el coste total para el abasto de una familia de productos. Las variables de decisión consideradas por dichos autores son: la cantidad ordenada de cada producto transportado por alguno de los modos, el inventario final y el descuento proporcionado al proveedor por aceptar la estrategia *ECR*. En este modelo, sin embargo, se determina previamente la proporción de carga para cada uno de los modos de transporte considerados.

El producto de este trabajo, es el desarrollo de un método de solución exacto para el modelo sin coordinación y un algoritmo heurístico para el modelo exacto, pero usando la estrategia de coordinación *ECR*.

3.5.2 Coordinación entre un proveedor y varios clientes

En términos generales, los modelos entre un proveedor y varios clientes, que consideran las variables fundamentales del transporte, se encuentran en el contexto de redes de suministro. Los primeros modelos de red se enfocaron exclusivamente al problema de localización de instalaciones. Los más recientes involucran el control de los inventarios y la planeación del transporte, es decir, en ellos ya se reconoce que dichas áreas necesitan estar estrechamente coordinadas. No obstante la relevancia de los primeros modelos de esta clase, la coordinación de los inventarios es considerada de manera implícita en el diseño de la red de distribución. Son muchos los modelos desarrollados de este tipo, por ello, a manera de ejemplo, se han seleccionado tres artículos cuyo contenido aportan aspectos importantes para esta investigación.

En ese sentido, Jayaraman (1998) elabora un modelo que incluye la relación entre la gestión del inventario, la localización de las instalaciones y la determinación de una política de transporte en el contexto del diseño de una red de distribución. Para este autor, dichas actividades actúan recíprocamente. Por ejemplo, establece que cada una de las alternativas posibles para ubicar instalaciones requiere de algún tipo y cantidad específica de transporte, lo que implica un sistema de gestión de inventario diferente. Por esta razón, el autor analiza la interdependencia entre las tres actividades y propone un modelo integrado para el diseño de una red de distribución que requiere de altos niveles de coordinación. El modelo propuesto se espera que proporcione un mayor desempeño entre los tres componentes, y que conduzca a mejores soluciones. En concreto, busca evaluar la elección de un sistema operativo en particular, no solo sobre la base de tiempo de tránsito o del coste.

En términos generales, los modelos matemáticos de localización son diseñados para contestar las siguientes preguntas: ¿Cuántas instalaciones deben ser ubicadas? ¿Dónde deben ser localizadas? ¿Cómo debe ser asignada la demanda del cliente en cada instalación? Las respuestas de estas interrogantes, lleva consigo implícitamente la determinación de la política de transporte e inventarios. Por ejemplo, las decisiones estratégicas de localización de un centro de distribución pueden incluir la determinación y localización del número de almacenes y plantas, capacidad de almacén y planta, proporción de carga, asignación de demandas del cliente para abrir los almacenes, y asignación de almacenes abiertos para abrir las plantas, entre otros. Por lo que respecta

a las decisiones estratégicas de transporte, incluyen la selección del modo (ferrocarril, autotransporte, aéreo, marítimo), ya sea propio o rentado. Otras decisiones pueden involucrar el tamaño del embarque (o frecuencia del embarque), y la asignación de cargas a los vehículos. Las decisiones del inventario se preocupan por el nivel de inventario total en el sistema, localización de los mismos, y los niveles del ciclo de existencia de varias localizaciones.

Existe una interdependencia fuerte entre los tres tipos de decisiones. Un aumento en el número de centros de distribución incrementa el inventario del sistema total. La localización de los inventarios también determina la opción del modo de transporte, tipo y elección del transportista. La decisión de mantener un buen servicio al cliente requeriría del uso de modos de transporte más rápidos y más fiables. Una decisión para cambiar el nivel promedio del ciclo de las existencias, llevaría a cambiar el tamaño del embarque en una instalación. Debido a las recientes tendencias tecnológicas y de competitividad, las compañías están convencidas en que no es muy correcto, a la larga, asumir que es suficiente considerar únicamente los costes de transporte por unidad cuando se analiza la localización de los centros de distribución; o considerar las decisiones de inventario, relacionadas con el número y localización de los almacenes, de manera independiente de las decisiones de transporte.

Por lo anterior, Jayaraman (1998) busca minimizar los costes totales de distribución asociados a los tres factores de decisión (localización de instalaciones, niveles de inventario y selección de las alternativas de transporte). Además, busca representar diferentes opciones de transporte, y explícitamente, requiere que las demandas de los puntos de venta del cliente, para todos los productos, sean satisfechos por los centros de distribución abiertos. El problema por tanto, es determinar simultáneamente la alternativa de transporte y el nivel de inventario, junto con el número y localización de las plantas y centros de distribución que llevaría a los costes totales más bajos de inventario, transporte y localización.

El modelo matemático denominado FLITNET (*Facility Location, Inventory, Transportation Network*) está construido sobre la base de la programación entera mixta y relaciona los atributos del modo de transporte, localización de los centros de distribución y plantas, así como los parámetros de la política de inventario, sujeto a las restricciones impuestas por el diseño de la red de distribución.

La anotación utilizada es la siguiente:

- $I =$ Conjunto de plantas potenciales
- $J =$ Conjunto de almacenes potenciales
- $K =$ Conjunto de puntos de venta de los clientes
- $L =$ Conjunto de productos
- $R =$ Conjunto de modos de transporte diferentes
- $T_{ijlr} =$ Coste unitario de transporte por enviar el producto l entre la planta i y almacén j por el modo de transporte r
- $F_{ijlr} =$ Frecuencia del embarque de usar el modo de transporte r para el producto l de la planta i al almacén j
- $d_{jklr} =$ Coste unitario de entrega por enviar el producto l entre el almacén j y punto de la demanda k que usa el modo de transporte r
- $L_{ijlr} =$ Promedio de ciclo de entrega para embarques del producto l de la planta i al almacén j por el modo de transporte r
- $CS_{ijlr} =$ Coste del ciclo de inventario en la planta i asociado con el embarque de producto l al almacén j por el modo de transporte r
- $CC_{il} =$ Coste unitario de manutención del producto l en la planta i
- $CW_{jl} =$ Coste unitario del inventario del producto l en el almacén j
- $C_{lr} =$ Coste unitario del inventario en tránsito del producto l por unidad de tiempo de tránsito en el modo de transporte r
- $a_{kl} =$ Demanda del cliente k para del producto l
- $W_j =$ Capacidad del almacén
- $G_i =$ Capacidad de la planta
- $F_j =$ Coste fijo para abrir y operar un almacén
- $O_i =$ Coste fijo por abrir y operar una planta
- $S_l =$ Espacio ocupado por el producto l
- $W =$ Número de almacenes por abrir
- $P =$ Número de plantas por abrir

Los costes totales del modelo FLITNET son expresados como sigue:

Coste anual = coste fijo por abrir y operar un almacén + coste de transporte + coste de entrega + coste del inventario en tránsito + coste del ciclo de existencia en la

planta + coste del ciclo de las existencias en el almacén + coste fijo por abrir y operar una planta.

El modelo propuesto para este caso, está constituido por la función objetivo y las restricciones siguientes:

$$\begin{aligned} \text{Minimizar } Z = & \sum_j F_j Z_j + \sum_i \sum_j \sum_l \sum_r T_{ijlr} X_{ijlr} + \sum_j \sum_k \sum_l \sum_r d_{jklr} Y_{jklr} + \\ & \sum_i \sum_j \sum_l \sum_r C_{lr} L_{ijlr} X_{ijlr} + \sum_i \sum_j \sum_l \sum_r 0.5 * (CC_{il} * X_{ijlr} / F_{ijlr}) + \\ & \sum_i \sum_j \sum_l \sum_r 0.5 * (CW_{jl} * X_{ijlr} / F_{ijlr}) + \sum_i O_i P_i \end{aligned} \quad (3b.1)$$

$$\text{Sujeto a: } \sum_j \sum_r Y_{jklr} = a_{kl} \quad \forall k, l \quad (3b.2)$$

$$\sum_k \sum_l \sum_r S_l Y_{jklr} \leq W_j Z_j \quad \forall j \quad (3b.3)$$

$$\sum_j Z_j \leq W \quad (3b.4)$$

$$\sum_k Y_{jklr} \leq \sum_i X_{ijlr} \quad \forall l, r, j \quad (3b.5)$$

$$\sum_j \sum_r \sum_l S_l X_{ijlr} \leq G_i P_i \quad \forall i \quad (3b.6)$$

$$\sum_i P_i \leq P \quad (3b.7)$$

$$X_{ijlr}, Y_{jklr} \geq 0 \quad \forall i, j, k, l, r \quad (3b.8)$$

$$Z_j, P_i = \{0, 1\} \quad \forall i, j \quad (3b.9)$$

Para el modelo, las variables de decisión son:

X_{ijlr} = Cantidad total de producto l enviado desde la planta i al almacén j por el modo de transporte r

Y_{jklr} = Cantidad total de producto l enviado del almacén j a los puntos de demanda k por el modo de transporte r

Z_j = {1 si el almacén j está abierto; 0 de otra manera}

P_i = {1 si la planta i está abierta; 0 de otra manera}

La formulación anterior involucra, minimizar el coste por la localización de almacenes y plantas, el coste relacionado con el inventario, coste de transporte para el

movimiento de los productos desde las plantas hasta los almacenes y el coste de entrega de los productos desde los almacenes a los puntos de venta del consumidor (3b.1). La condición (3b.2) asegura que la demanda de cada cliente sea satisfecha. La condición (3b.3) representa la restricción de capacidad del almacén abierto j de acuerdo con la demanda de los clientes. La restricción (3b.4) asegura la localización de los almacenes W . La (3b.5) establece que toda la demanda de cliente k para el producto l es equilibrada por las unidades totales de producto l disponible en el almacén j que se ha transportado de las plantas. La condición (3b.6) representa la restricción de capacidad de planta k por lo que se refiere a la cantidad de demanda que puede manejarse. La restricción (3b.7) delimita el número de plantas abiertas para no exceder la cantidad de plantas P . La (3b.8) es la condición de no negatividad del conjunto de variables de decisión (X_{ijlr}, Y_{jklr}) y la restricción (3b.9) establece la naturaleza binaria sobre los otros dos conjuntos de variables de decisión (Z_j, P_i) .

Qu, *et al.* (1999) también reconocen que las áreas fundamentales de control de inventarios y de planeación de transporte necesitan estar estrechamente coordinadas. Por ello, desarrollan un sistema que integra decisiones de transporte y de inventario por medio de la combinación de una política de revisión periódica modificada y una componente del problema del vendedor viajero. El modelo se construye considerando el abasto de múltiples artículos en un ambiente estocástico con decisiones simultáneas de inventario y de transporte.

El contexto de la investigación se establece a partir de un almacén central que requiere abastecer de productos a un conjunto de detallistas por medio del uso de una flota vehicular (propiedad o controlado por el almacén). El objetivo consiste en determinar una estrategia de abasto (reglas de control del inventario y patrones de ruteo) que permitan a dicho almacén satisfacer su demanda al coste mínimo total de largo plazo por unidad de tiempo.

El modelo de inventario considera un coste fijo de resurtido que es compartido entre todos los artículos incluidos en un abastecimiento determinado, así como un coste mínimo que depende del artículo incluido en el pedido. Se considera que se incurre en un coste de almacenamiento de inventario a una tasa constante por unidad de tiempo. También, se asume que el coste total por faltantes en el almacén es proporcional al

número total de unidades no entregadas. En el problema de transporte se considera un coste fijo para cada parada que realice un vehículo, más un coste variable proporcional a la distancia de viaje. La capacidad del vehículo se asume que es ilimitada. Por otro lado, se establece que no se permitirá escasez o retardos en cualquier recolección.

Por lo anterior, para cada período de surtido j hasta M , el coste de transporte incluye los costes de parada $\gamma_{pj}k_{Tp}$ (en aquellas plantas visitadas, p), más los costes de operación del viaje $cD(S_j)$. En promedio, para cada ciclo de longitud MT , el coste de transporte es determinado como:

$$\text{Coste promedio de transporte} = \sum_{j=1}^M \left(\sum_{p=1}^P \gamma_{pj}k_{Tp} + cD(S_j) \right) / MT \quad (3b.10)$$

Por su parte, los costes por ordenar están compuestos por el coste fijo (K) por lanzar un pedido, y el coste individual por ordenar el producto (i), que es incluido en la orden (K_{li}). Es decir:

$$\text{Coste promedio ordenar} = \sum_{j=1}^M \left(K + \sum_{i=1}^N y_{ij}k_{li} \right) / MT = K/T + MOC \quad (3b.11)$$

Donde los costes menores por ordenar son determinados por:

$$MOC = \sum_{i=1}^N k_{li} / m_i T \quad (3b.12)$$

Siguiendo a Hadley y Whitin (1963), los autores convienen en calcular el coste de almacenamiento entre la llegada de dos órdenes sucesivas, en lugar de considerar el período de lanzamiento entre dichas órdenes. Cuando un pedido es lanzado, el almacén espera un tiempo de ciclo constante L para que los artículos lleguen, después del cual el nivel de inventario esperado para el artículo i está dado como: $R_i - \lambda_i L$.

El siguiente pedido llega $m_i T + L$ tiempo después, y el nivel de inventario correspondiente justo antes de la llegada de dicha orden es $R_i - \lambda_i (m_i T + L)$. Por lo tanto, el nivel de inventario neto promedio (disponible menos faltantes) del artículo i

durante el intervalo, es aproximadamente: $R_i - \lambda_i(L - m_i T / 2)$. Para este grado de exactitud, el coste de posesión promedio de largo plazo es definido por:

$$H = \sum h_i [R_i - \lambda_i(L + m_i T / 2)] \quad (3b.13)$$

Por otro lado, un faltante ocurre después de que una orden es lanzada en el tiempo t , si la demanda acumulativa x_i (entre t y $t + L + m_i T$) excede R_i . Habrá entonces un coste de penalización π para cada unidad faltante. Si la demanda tiene una función de densidad $f(x_i; L + m_i T)$ sobre el intervalo de longitud $L + m_i T$, el coste promedio del faltante BL en el largo plazo esta determinado por:

$$BL = \sum_{i=1}^N (\pi_i / m_i T) \int_{R_i}^{\infty} (x_i - R_i) f(x_i, L + m_i T) dx_i \quad (3b.14)$$

Finalmente, los autores asumen que las demandas de los artículos dados son independientes e idénticamente distribuidas en la forma de un proceso de movimiento de Brownian. Es decir, cuando fijan las variables de decisión m_i y T , la demanda sobre cualquier intervalo de tiempo particular de longitud τ se distribuye normalmente con: $E(x_i; T) = \lambda_i T$ y $Var(x_i, \tau) = \lambda_i \tau$. Considerando que $G = MOC + H + BL$. Entonces el objetivo es minimizar el coste total esperado de largo plazo C en el problema a continuación:

$$\min C = \sum_{j=1}^M \left(\sum_{p=1}^P \gamma_{pj} k_{Tp} + cD(S_j) \right) / MT + K / T + G \quad (3b.15)$$

Sujeto a:

$$M = \text{Mínimo Común Múltiple de } (m_1, m_2, \dots, m_N) \quad (3b.16)$$

$$y_{it} = \begin{cases} 1 & \text{sí } m \text{ divide a } j \text{ exactamente} \\ 0 & \text{de otra manera} \end{cases} \quad (3b.17)$$

$$\gamma_{it} = \begin{cases} 1 & \text{sí } \sum_{i=1}^N y_{ij} \theta_{ijP} > 0 \\ 0 & \text{de otra manera} \end{cases} \quad (3b.18)$$

$$0 \neq S \subseteq S \quad (3b.19)$$

$$m_i \text{ es entero; } R_i, T \geq 0 \text{ y } 1 \leq i \leq N, \quad 1 \leq j \leq M, \text{ y } 0 \leq p \leq P \quad (3b.20)$$

Para resolver el problema anterior, los autores proponen un método de solución por fases del tipo heurístico, minimizando los costes totales promedio de largo plazo. Es decir, el algoritmo trabaja utilizando cálculos por separado del inventario y de las decisiones de ruteo, para luego coordinarlas apropiadamente. Puesto que el coste mínimo es desconocido, una cota inferior es encontrada para evaluar la efectividad del procedimiento heurístico.

Recientemente, Eskigun, *et al.* (2005) desarrollaron un modelo de optimización para simular la entrega de automóviles desde las plantas ensambladoras a los centros de distribución/consolidación. Particularmente, el enfoque del modelo está dirigido a minimizar los costes fijos de las instalaciones y de transporte, considerando el tiempo de ciclo, la localización de las instalaciones y la selección del modo de transporte. En términos generales, dicho trabajo puede ubicarse en el contexto del diseño de la red de la cadena de suministro desde el punto de vista de la localización de instalaciones.

El modelo busca contestar las siguientes preguntas: *i)* ¿Dónde ubicar los centros de distribución? *ii)* ¿Cuál debe ser el tamaño (capacidad) del centro de distribución? *iii)* ¿Cómo deben ser entregados los vehículos por áreas de demanda, por camiones o por el centro de distribución? y *iv)* ¿Cuál debe ser el volumen en cada centro de distribución?

La función objetivo del problema está determinada por: la suma de los costes de transporte, el coste del tiempo de ciclo y los costes fijos. Este modelo considera el tiempo de espera en las plantas y en los centros de distribución así como el tiempo total del ciclo de entrega de las plantas a las zonas de demanda. Esta consideración, en especial, es el principal elemento que distingue a este trabajo con respecto a otros relacionados con el diseño de la red.

Los parámetros considerados en el modelo, son los siguientes:

d_{ik} = Demanda total del tipo de vehículos de la planta i en la zona de demanda k

cpv_{ij} = Coste unitario de transportar un vehículo por ferrocarril desde la planta i al centro de distribución j (VDC) (incluye el coste de operación del VDC por vehículo)

cvd_{jk} = Coste unitario de transportar un vehículo desde el centro de distribución j (VDC) hasta la zona de demanda k por medio de camión

cpd_{ik} = Coste unitario de transportar un vehículo desde la planta i a la zona de demanda k de manera directa por medio de camión

tpv_{ij} = Tiempo de tránsito desde la planta i al centro de distribución j

tvd_{jk} = Tiempo de tránsito desde el centro de distribución j a la zona de demanda k

fv_j = Coste fijo por abrir el centro de distribución j (este coste no depende del volumen o capacidad del centro, pero es fijo al establecer uno nuevo)

kv_j = Número máximo de vehículos que pueden ser enviados a través del centro de distribución j durante el año

h = Valor del dinero en el tiempo de ciclo (\$/día), tasado por la compañía

Como variables de decisión:

$$X_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{Si los vehículos son entregados desde la planta } i, \text{ a la zona de demanda} \\ & k \text{ a través del centro de distribución } j \\ 0 & \text{de otra manera} \end{cases}$$

$$Z_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{Si los vehículos son entregados desde la planta } i \text{ a la zona de demanda} \\ & k \text{ directamete por camión} \\ 0 & \text{de otra manera} \end{cases}$$

$$V_j = \begin{cases} 1 & \text{Si el centro de distribución } j \text{ es abierto} \\ 0 & \text{de otra manera} \end{cases}$$

$LTPVD_{ijk}$ = Tiempo de ciclo de los vehículos transportados desde la planta i al centro de distribución j a la zona de demanda k

$$LTPVD_{ijk} = DTPV_{ij} + DTVD_{jk} + tpv_{ij} + tvd_{jk} \quad (3b.21)$$

Donde $DTPV_{ij}$, $DTVD_{jk}$, tpv_{ij} y tvd_{jk} son definidas en las funciones de tiempo de demoras y en la sección de parámetros, respectivamente.

$LTPD_{jk}$ = Tiempo de ciclo de los vehículos transportados directamente desde la planta i a la zona de demanda k por medio de camión.

$$LTPD_{ik} = DTPD_{ik} + tvd_{ik} \quad (3b.22)$$

Donde $DTPD_{ik}$ y $tv d_{ik}$ son definidas en las funciones de tiempo de demora y en la sección de parámetros, respectivamente.

Las funciones de demora son:

$DTPV_{ij}$ = Tiempo promedio de demora de los vehículos enviados desde la planta i al centro de distribución j .

$$DTPV_{ij} = \begin{cases} c_{ij}^1 + \frac{c_{ij}^2}{\sum_k d_{ik} X_{ijk}} & \text{si } \sum_k d_{ik} X_{ijk} > 0 \\ 0 & \text{de otra manera} \end{cases} \quad (3b.23)$$

Donde c_{ij}^1 y c_{ij}^2 son constantes.

$DTPD_{ij}$ = Tiempo de demora de los vehículos transportados directamente desde la planta i hasta la zona de demanda k .

$$DTPD_{ik} = \begin{cases} c_{ij}^3 + \frac{c_{ij}^4}{Z_{ik}} & \text{Si } Z_{ik} > 0 \\ 0 & \text{de otra manera} \end{cases} \quad (3b.24)$$

Donde c_{ij}^3 y c_{ij}^4 , son constantes.

$DTVD_{ij}$ = Tiempo de demora de los vehículos en el VDC j los cuales son enviados a la zona de demanda k .

$$DTVD_{ij} = \begin{cases} c_{ij}^5 + \frac{c_{ij}^6}{\sum_k d_{ik} X_{ijk}} & \text{Si } \sum_k d_{ik} X_{ijk} > 0 \\ 0 & \text{de otra manera} \end{cases} \quad (3b.25)$$

Donde c_{ij}^5 y c_{ij}^6 , son constantes.

Por lo tanto, el problema de optimización está constituido por la función objetivo y las restricciones siguientes:

$$\begin{aligned} \text{Minimizar } & \sum_{ijk} (cpv_{ij} + cvd_{jk}) \cdot d_{ik} X_{ijk} + \sum_{ik} (cpd_{ik}) \cdot d_{ik} Z_{ik} \\ & + \sum_{ijk} h(LTPVD_{ijk}) \cdot d_{ik} X_{ijk} + \sum_{ik} h(LTPD_{ik}) \cdot d_{ik} Z_{ik} + \sum_j (fv_j) \cdot V_j \end{aligned} \quad (3b.26)$$

$$\text{Sujeto a: } \sum_j X_{ijk} + Z_{ik} = 1 \quad \forall i, k \quad (3b.27)$$

$$\sum_{ik} d_{ik} X_{ijk} \leq (kv_j) V_j \quad \forall j \quad (3b.28)$$

$$X_{ijk}, Z_{ik}, V_j \in \{0,1\} \quad \forall i, j, k \quad (3b.29)$$

El primer término en la función objetivo representa el coste total de transporte desde las plantas a los centros de distribución a la zona de demanda. El segundo de los términos son los costes asociados al transporte con envíos directos desde las plantas a las zonas de demanda. Las siguientes dos sumatorias se refieren a los costes de tiempo de ciclo de los embarque desde el centro de distribución y envíos directos, respectivamente. La última suma representa los costes fijos por abrir un centro de distribución. La condición (3b.27) garantiza que la demanda en la zona k es servida a través de un centro de distribución o por envíos directos, pero no ambos. La condición (3b.28) asegura que el número de vehículos entregados a través del centro de distribución dentro de un período de planeación no excede el límite de capacidad.

Debido a que este problema es no lineal, Eskigun, *et al.* (2005) introduce nuevas restricciones y variables binarias para formular el modelo como un problema de programación lineal entero. Definen:

$$A_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{Si } \sum_k X_{ijk} > 0 \\ 0 & \text{de otra manera} \end{cases} \quad (3b.30)$$

$$B_{jk} = \begin{cases} 1 & \text{Si } \sum_k X_{ijk} > 0 \\ 0 & \text{de otra manera} \end{cases} \quad (3b.31)$$

$$E_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{Si } \sum_k Z_{ik} > 0 \\ 0 & \text{de otra manera} \end{cases} \quad (3b.32)$$

Estas nuevas variables representan los arcos que van desde las plantas (A_{ij}) a los centros de distribución. De éstos a las zonas de demanda (B_{jk}) y de las plantas directamente a las zonas de demanda (E_{ik}). Eskigun, *et al.* (2005) agregan restricciones para asegurar que las relaciones antes definidas se mantengan. Dichas restricciones son definidas como a continuación se presentan:

$$X_{ijk} \leq A_{ij} \quad \forall i, j, k \quad (3b.33)$$

$$X_{ijk} \leq B_{jk} \quad \forall i, j, k \quad (3b.34)$$

$$Z_{ik} \leq E_{ik} \quad \forall i, k \quad (3b.35)$$

Juntas, estas restricciones garantizan que las variables toman el valor de uno cuando existe al menos un vehículo entregado entre dos localizaciones dadas. De otra manera se vuelve cero.

Cuando el tiempo de ciclo y el tiempo de demora son escritas en términos de las nuevas variables definidas y substituidas en la función objetivo, la formulación anterior puede reducirse y ser redefinida como un modelo de programación lineal entero con la ayuda de variables binarias y la redefinición de las funciones del tiempo de demora.

Proposición 1.

$$\sum_{ijk} h(LTPVD_{ijk}) \cdot d_{ik} X_{ijk} = \sum_{ijk} h(c_{ij}^1 + c_{ik}^5 + tpv_{ij} + tvd_{jk}) d_{ik} X_{ijk} + \sum_{ij} h(c_{ij}^2) A_{ij} - \sum_{jk} h(c_{jk}^6) B_{jk} \quad (3b.36)$$

Proposición 2.

$$\sum_{ijk} h(LTPD_{ik}) \cdot d_{ik} X_{ik} = \sum_{ijk} h(c_{ik}^3 + tpd_{ik}) d_{ik} Z_{ik} + \sum_{ij} h(c_{ik}^4) E_{ik} \quad (3b.37)$$

Con estas dos proposiciones, el modelo es establecido como un modelo de programación lineal entero. Después de presentar el modelo, dichos autores desarrollan un conjunto adicional de parámetros para hacer más fácil la lectura del mismo. Sea:

$$\delta_{ijk}^r = \text{Coste lineal de entregar un vehículo desde la planta } i \text{ a la zona de demanda } k \text{ a través del centro de distribución } j = cpv_{ij} + cvd_{jk} + h(c_{ij}^1 + c_{ik}^5 + tpv_{ij} + tvd_{jk})$$

$$\delta_{ik}^t = \text{Coste lineal de entregar un vehículo desde la planta } i \text{ a la zona de demanda } k \text{ directamente por camión} = cpd_{ik} + h(c_{ik}^3 + tpd_{ik})$$

$$\gamma_{ij}^r = \text{Coste fijo por operar una ruta entre la planta } i \text{ y el centro de distribución } j = h(c_{ik}^3)$$

$\gamma_{jk}^v =$ Coste fijo por abrir una ruta entre un centro de distribución j y la zona de demanda $k = h(c_{jk}^6)$

$\gamma_{ik}^t =$ Coste fijo por abrir un arco entre la planta i y la zona de demanda $k = h(c_{ik}^4)$

Con base en lo anterior, el modelo modificado queda de la siguiente manera:

$$\text{Minimizar } \sum \delta_{ijk}^r d_{ik} X_{ik} + \sum \delta_{ik}^t d_{ik} Z_{ik} + \sum \gamma_{ij}^r A_{ij} + \sum \gamma_{jk}^v B_{jk} + \sum \gamma_{ik}^t E_{ik} - \sum_j (fv_j) \cdot V_j \quad (3b.38)$$

$$\text{Sujeto a: } A_{ij}, B_{jk}, E_{ik} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j, k \quad (3b.39)$$

y las restricciones 3b.27 a la 3b.35

El modelo es un programa lineal entero donde todas las variables son binarias. Cuando son relajadas las restricciones 3b.33 a la 3b.35, el modelo se convierte en un problema de localización de una instalación con capacidad definida. Cuando la restricción 4b.28 no es considerada, el problema se convierte en problema de flujo en red. Cuando las restricciones 3b.28 y de la 3b.33 a la 3b.35 son relajadas, se convierte un modelo estándar de asignación.

Los autores reconocen que el modelo no es práctico cuando aumenta la cantidad de plantas, centros de distribución o zonas de demanda. Y que se torna complicado obtener soluciones exactas en un tiempo razonable de cómputo. Por lo tanto, desarrollaron un algoritmo con base lagrangeana para obtener soluciones cercanas al óptimo.

De acuerdo con Eskigun, *et al.* (2005), los resultados del algoritmo indicaron que el tiempo de ciclo gana importancia. Señalan que, con el uso de camiones, el tiempo de ciclo, de enviar vehículos directamente desde las plantas a las zonas de demanda, se realiza en corto tiempo. Sin embargo, el tiempo promedio de entrega no baja del 65.34% con respecto al caso base. Lo anterior se debe a los tiempos de procesamiento (tiempo de demora) que se presentan en las plantas y los centros de distribución. Con el uso de camiones resultó mayor el coste de transporte en comparación con el ferrocarril. Adicionalmente, cuando el volumen de vehículos entregados directamente por camiones crece, el número de centros de distribución abiertos bajan significativamente y el efecto

en los indicadores de capacidad de la cadena de suministro son menores. Aún cuando no se menciona, los resultados obtenidos en este trabajo, muestran claramente la relación entre el nivel de inventario y el coste de transporte. Por ejemplo, más centros de distribución, menores costes de transporte pero un mayor nivel de inventarios y viceversa.

3.5.3 Características principales de los modelos de coordinación de inventarios considerando las variables fundamentales del transporte

En el cuadro 3.2 se muestra el resumen de las características más relevantes de los modelos de coordinación de inventarios que consideran las variables fundamentales del transporte.

En dicho cuadro se aprecia que los documentos reportados, tratan la demanda como un elemento estocástico o determinista. En la mayoría de los casos, los modelos son desarrollados para el abasto de un producto. En este sentido, se observan dos casos que analizan para más de un producto la estrategia de coordinación directa de inventarios (van Eijs, 1994 y Reyes-Gaytán, 2002); otros dos, con un enfoque de diseño red y con coordinación implícita de inventarios, atienden también un problema multi-producto (Jayaraman, 1998 y Qu, *et al*, 1999).

Por lo que respecta a la estructura de la cadena de suministro analizada, se encontró que la estructura básica (cliente-proveedor) es el punto de referencia para la mayoría de los investigadores que estudian el tema de la coordinación de inventarios considerando al transporte. Es de sumo interés observar que algunos autores incluyen al transportista como un miembro más de la cadena (Lei, *et al*, 2003, y Choi, *et al*, 2004). Derivando del contexto que presentan en sus investigaciones, en cierta forma puede decirse que es muy novedoso, ya que sus análisis reconocen fehacientemente el efecto que produce la coordinación del abasto entre cliente y proveedor, en los beneficios directos para el transportista.

Por lo que respecta al horizonte de planeación, la mayor parte de los modelos se enfocan a atender el control de inventarios sin algún tipo de restricción en el tiempo, es decir, son utilizados de manera infinita en cada período. Por su parte, solo algunos modelos consideran la planeación finita para llevar sus análisis a una situación más dinámica, es decir, plantean un número N de períodos fijos para llevar a cabo el análisis

del comportamiento de los inventarios en el tiempo, con énfasis en la toma de decisiones estratégicas. Al igual que los modelos de coordinación de inventarios destallados en la sección 3.4 (basado en Jiménez, 2005), una parte importante de los modelos revisados consideran el valor del precio de los productos o mercancías, como un parámetro (una constante); para otras, este factor es un mecanismos utilizado para promover la coordinación, y como tal, es considerado como una variable a determinar, ya sea para el caso de aplicar una política de descuentos por volumen o para inducir a aceptar ciertas condiciones operativas de abastecimiento.

Cuadro 3.2
Características principales de los modelos de coordinación de inventarios considerando las variables fundamentales del transporte

	Autor	Año	Demanda	Producto	Eslabones	Horizonte de planeación	Precio del producto	Modos	Variable de transporte clave	Control del canal
1	Constable y Whybark	1978	Aleatoria	Un producto	Un cliente Un proveedor	Infinito	Constante	Unimodal	Tiempo de transporte	Proveedor
2	Van Eijs	1994	Aleatoria	Multi-producto	Un cliente Un proveedor	Infinito	Constante	Unimodal	Tiempo de ciclo, esquema de consolidación	Proveedor
3	Jayaraman	1998	Determinista	Multi-producto	Varios proveedores Varios clientes	Infinito	Constante	Unimodal	Coste de transporte, tiempo de entrega	Proveedor
4	Qu, <i>et al.</i>	1999	Aleatoria	Multi-producto	Un proveedor Varios clientes	Infinito	Constante	Unimodal	Coste de transporte	Proveedor
5	Hoque y Goyal	2000	Determinista	Un producto	Un cliente Un proveedor	Infinito	Constante	Unimodal	Capacidad de transporte	Proveedor
7	Lei, <i>et al.</i>	2003	Determinista	Un producto	Un proveedor Un transportista Un cliente	Infinito	Variable	Unimodal	Tarifa y coste unitario de transporte	Ninguno
8	Toptal	2003	Determinista	Un producto	Un proveedor Un Fabricante Un cliente	Finito	Constante	Unimodal	Costes de abasto (entrada) y entrega	Proveedor
9	Reyes y Gaytán	2003	Determinista y variable	Multi-producto	Un proveedor Un cliente	Finito	Variable	Dos modos	Coste de transporte, tiempo de entrega	Cliente
10	Choi, <i>et al.</i>	2004	Determinista	Un producto	Un proveedor Un transportista Un cliente	Infinito	Variable	Unimodal	Tarifa, coste unitario de transporte y nivel de ingresos	Ninguno
11	Zhao, <i>et al.</i>	2004	Determinista	Un producto	Un proveedor Un cliente	Infinito	Constante	Unimodal	Capacidad de transporte, tiempo de ciclo, costes fijos y variables	Proveedor
6	Sethi, <i>et al.</i>	2005	Aleatoria	Un producto	Un proveedor Un cliente	Finito	Constante	Tres modos	Nivel de servicio, tiempo de entrega	Proveedor
12	Eskigun, <i>et al.</i>	2005	Determinista	Un producto	Varios proveedores Varios clientes	Infinito	Constante	Unimodal	Tiempo de ciclo, selección del modo de transporte	Proveedor
13	Abad, PL y Aggarwal, V.	2005	Determinista	Un producto	Un proveedor Un cliente	Infinito	Constante	Unimodal	Capacidad y tarifa de transporte	Proveedor

Por lo que se refiere al transporte, en términos generales los modelos que incluyen sus variables fundamentales no distinguen más de un modo de transporte. Es decir, atienden el problema unimodal. Solamente dos artículos (Sethi, *et al.*, 2005 y Reyes-Gaytán, 2003) involucran más de un modo de transporte. Considerando el artículo de Sethi, *et al.* (2005), y a manera de conclusión, se puede establecer que la idea de tener en cuenta al transporte como un elemento vital para el control de los sistemas de inventario no es reciente; sin embargo, en la actualidad muy pocos son los estudios en el contexto de la coordinación de inventarios que esto se llevan a cabo, y mucho menos, se

consideren esquemas multimodales o la combinación de los diferentes modos de transporte para el envío de los productos. Lo anterior, puede deberse a la complejidad que implica el modelado de la combinación de las distintas posibilidad de transporte para más de dos modos.

En este mismo sentido, las variables fundamentales del transporte que más se han considerado en los modelos de coordinación de inventarios, son: el coste de transporte, tiempo de ciclo para la entrega de los productos, capacidad de transporte, tiempo en tránsito, velocidad de entrega (nivel de servicio) y con menor frecuencia, la elección del modo de transporte.

Finalmente, como ya fue mencionado, los investigadores que tratan este importante tema de la coordinación de inventarios, en los que involucran las variables fundamentales del transporte, son muy escasos y llevan a cabo los estudios en diversos contextos de análisis, algunos, vertidos en estrategias de coordinación planteadas a partir de algún tipo de visión (proveedor, cliente o ambos). En general, puede establecerse que los estudios realizados para el control y gestión de inventarios que incluyen las variables fundamentales del transporte, no parece seguir un patrón específico; en cambio, puede observarse que han surgido líneas de investigación que pueden ser ampliamente extendidas.

3.6 Conclusiones

En esta última sección se presentan algunos comentarios concluyentes de la literatura revisada, pero sobre todo, plantea algunas reflexiones sobre la temática de la gestión de inventarios y su relación con el transporte.

3.6.1 Sobre los modelos de coordinación de inventarios

Durante décadas, el tema del control y gestión de inventarios ha sido una de las materias de mayor interés para practicantes e investigadores, y sin lugar a dudas, hoy en día sigue siendo un tópico de gran trascendencia. Por mucho tiempo, la importancia principal de los inventarios se sustentó en la tesis de disponer de los insumos necesarios para mantener en operación las líneas de producción, o para responder, con grandes volúmenes de inventario, a las grandes variaciones de los requerimientos de los clientes.

De acuerdo con el nuevo orden mundial, la gestión de inventarios ha dejado de ser una actividad funcional para convertirse en un elemento estratégico de competitividad.

Las condiciones actuales de competitividad han obligado a las empresas a buscar nuevos modelos de gestión que les permitan ser más eficientes en sus diversas áreas, en particular, dentro de sus sistemas de abasto y administración de inventarios. En tal virtud, y de acuerdo con la documentación revisada para la conformación de este capítulo, se pudo detectar que los sistemas de inventarios subyacen en diversos contextos de coordinación operados con modernas estrategias de gestión.

Lo anterior, parece ser un hecho ampliamente reconocido. Gran cantidad de investigadores han desarrollado una infinidad de modelos matemáticos de gestión de inventarios bajo muy diversos escenarios de análisis. En términos generales, los primeros modelos buscaron mejorar la administración de inventarios con gran énfasis para establecer la política más apropiada, y sobre todo, lograr la reducción individual de los costos logísticos. Modelos más recientes buscan los mismos objetivos, pero de manera colectiva o conjunta, es decir, buscan que los beneficios entre los socios comerciales se den al mismo nivel y tiempo en el contexto moderno de la cadena de suministro. En esta situación, se encuentran los modelos más recientes que tratan la coordinación de inventarios entre clientes y proveedores, diseñados para determinar el tamaño de lote económico conjunto y la política de pedido/entrega.

Los modelos de coordinación de inventarios están siendo ampliamente estudiados bajo diversos entornos de gestión. Por ejemplo, desde el modelo más simple de un proveedor y un cliente, hasta múltiples proveedores con múltiples clientes. Evidentemente, cada uno de estos tipos de modelos obedece a condiciones específicas del entorno de las empresas o cadenas de suministro específicas. Establecer que alguno de ellos es el más apropiado para cualquier caso, se estaría hablando de una falacia, pues se debe reconocer que no existen problemas de inventario iguales. Por supuesto, de ninguna manera ello significa que dichos modelos no puedan ser adaptados o extendidos a problemas similares dada su naturaleza genérica.

Algunos de los comentarios más relevantes que pueden establecerse, en torno a la revisión bibliográfica reportada en este capítulo, son mencionados a continuación:

- a. En términos generales, se pudo comprobar que la mayor parte de los modelos desarrollados están orientados a dar solución a problemas con demanda determinista y constante. Pocos son los estudios que analizan la demanda en un escenario dinámico (variable en el tiempo). Además, la mayoría de los autores modelan el abastecimiento considerando un producto.
- b. Por las características de cada modelo o situación analizada en los distintos escenarios, puede corroborarse que existe una enorme posibilidad de combinar los factores más relevantes de los modelos indagados. Ello significa que aún existe una variabilidad de problemas que pueden ser estudiados.
- c. Llama la atención que la mayor parte de las estrategias identificadas involucran el precio de los productos; de hecho, algunos autores establecen que es un mecanismo necesario para lograr la coordinación. Sin embargo, ello no implica descartar otros mecanismos que también pueden ser ayudas importantes en la conformación de un esquema más completo de coordinación.
- d. Sobre las técnicas de solución empleadas, algunos autores diseñan programas especiales de computo para hacer simulaciones con los modelos construidos para dar solución a su problemática específica, en particular, para aquellos modelos con un horizonte de planeación infinita; otros, emplean técnicas de optimización. En este contexto, los problemas que modelan son clasificados como *NP-hard*, por lo que proponen algoritmos heurísticos como una alternativa de solución.
- e. Todos los documentos revisados demuestran que la coordinación de inventarios es preferible a la gestión individual. Sin embargo, en términos generales se deduce que en el corto plazo los beneficios siempre son mucho más altos para el cliente que para el proveedor. En largo plazo, los proveedores logran alcanzar mayores beneficios. Algunos autores plantean que su modelo encuentra una solución con beneficios equilibrados, pero sólo bajo ciertas condiciones de estudio, por ejemplo, el número de clientes que se abastece.
- f. La estrategia “*Épocas Comunes de Resurtido*” es una buena alternativa de adaptación para el abasto de productos bajo programación. La posibilidad de formular un modelo que permita construir un programa de abastecimiento representa una salida práctica.

3.6.2. Sobre los modelos de inventarios y las variables fundamentales del transporte

El estudio conjunto de las actividades más influyentes en los costes logísticos, es una actividad de vital importancia. Al respecto, la consideración explícita del proceso de transporte en la gestión de inventarios, es sin duda, un aspecto que permite distinguir con mayor claridad el impacto en los costes de la gestión logística. Paulatinamente, el interés por el estudio conjunto de estas dos actividades logísticas ha venido creciendo bajo diferentes perspectivas de análisis. Sin embargo, a partir de la revisión realizada a la literatura, puede afirmarse que aún son pocos los autores que estudian este tema con un enfoque orientado a la coordinación de inventarios considerando las variables fundamentales del transporte.

En particular, el problema de los inventarios reside en que las empresas tratan de optimizar individualmente sus beneficios muchas veces en perjuicio de su cliente o proveedor. Diseñan políticas de inventario, por ejemplo, considerando la capacidad de respuesta de su contraparte comercial, sin tener en cuenta el impacto de la operación del transporte, creando un clima de incertidumbre que, de manera inmediata, se ve reflejada en altos costes logísticos para ambas partes. Por lo anterior, puede establecerse que mientras no exista algún tipo de coordinación, los costes logísticos seguirán siendo un gran problema para las empresas desintegradas.

En definitiva, puede establecerse que la interacción entre los inventarios y el transporte subyace en la determinación de la política de inventario que una empresa debe asumir, en torno al tamaño del pedido y el período de suministro, en función de las características del modo de transporte que se emplee. Así, las diferentes alternativas para transportar mercancía, conforman un conjunto de opciones con características exclusivas y con atributos especiales que subscriben distintos niveles de servicio. Por tanto, el tamaño del embarque en cada modo de transporte se especifica como una función de sus atributos. Desde el punto de vista operativo, en consecuencia, se observa la existencia de una relación recíproca entre estos dos elementos del sistema de inventario.

Para tratar de ser más precisos, a continuación se presenta una serie de comentarios concluyentes en torno a la influencia del transporte en la gestión de inventarios:

- a. El transporte es un elemento de la cadena de suministro que merece más atención en el sistema de inventarios, tanto en la práctica como en la investigación científica.
- b. El impacto del transporte en el sistema de gestión de inventario se ve reflejado en diversos escenarios de análisis, por ejemplo, en el diseño de la cadena de suministro, en la definición del tamaño del pedido, en la determinación de los períodos de abasto (*lead times*), en el coste total de gestión logística, etc.
- c. El precio de los productos se ve afectado por el nivel de servicio que presenta el transporte, y por lo tanto, impacta en los costes por almacenar y de inventarios en tránsito.
- d. La combinación modal de transporte es una alternativa de administración de los flujos de carga. Bien articulado, permite la reducción de los costes en el suministro de los productos.
- e. Bajo una adecuada gestión de los servicios de consolidación, el transporte es un factor fundamental para el logro de las economías de escala.
- f. El transporte aumenta la eficiencia interna de las empresas y permite la integración de los procesos de negocio (integración horizontal). En este sentido, el transporte no es independiente y autónomo frente a otras actividades del proceso de abasto, producción y distribución. En tal virtud, las empresas deben demandar una mayor coordinación con el transporte y sus actividades relacionadas con éste.

En concordancia con Sethi, *et al.* (2005), los planteamientos vertidos en los documentos revisados, permiten observar que los modelos de gestión multimodal no son muy socorridos. En general, los análisis se llevan a cabo a nivel unimodal y sólo para el caso de entregas. Toptal (2003) formula un modelo considerando el transporte de abasto y de distribución. En general, los datos de transporte utilizados en los modelos son parametrizados, es decir, ningún elemento del transporte es planteado como una variable de decisión.

La literatura revisada también permite observar diversas formas de abordar el tema del impacto del transporte en la gestión de inventarios. En general, la gran mayoría de los autores evalúan el coste como el principal factor de impacto, y muy

pocos el tiempo de viaje de las mercancías, o en su defecto, la capacidad de transporte. En realidad, un análisis de otro tipo, por ejemplo, considerando variables cualitativas como la confiabilidad o nivel de servicio del transporte, prácticamente no es realizado; ello puede deberse a las dificultades que presenta su modelado.

A partir de los resultados obtenidos en los estudios dedicados estrechamente con la coordinación de inventarios, que consideran las variables fundamentales del transporte, pueden corroborarse las ventajas en coste y beneficios alcanzados por el uso de estrategias de coordinación, no sólo para el cliente y el proveedor, sino también para el transportista. Por tal motivo, se justifica la idea de considerar en todo esquema de gestión al factor transporte como un elemento más en los sistemas de evaluación de estrategias de suministro. No considerarlo, implicaría seguir juzgándolo como una actividad funcional y no como una estrategia evolutiva que propicia ventajas competitivas.

El tratamiento formulado para la gestión de inventarios, considerando las variables fundamentales del transporte, contribuyen notablemente al conocimiento más detallado de la interacción entre estas dos actividades logísticas. Reconstruye esquemas tradicionales de la teoría de inventarios y tiene un gran impacto en los modelos de servicio al cliente.

Basado en los nuevos esquemas de coordinación de inventarios, a partir de la consideración explícita del transporte, las prácticas logísticas y las políticas de gestión deben cambiar hacia la búsqueda de una mayor integración de los procesos de negocio, formalizar esquemas de contratación de largo plazo, establecer alianzas estrategias, entre otros aspectos.

Referencias

1. (Banerjee y Banerjee, 1994) Banerjee, A. y Banerjee, S. (1994). "A Coordinated Order-Up-to Inventory Control Policy for a Single Supplier and Multiple Buyers Using Electronic Data Interchange". *International Journal of Production Economics*; vol. 35, pp. 85-91.
2. (Banerjee, 1986) Banerjee, A. (1986). "A Joint Economic Lot Size Model for Purchaser and Vendor". *Decision Sciences*; vol. 17, pp. 292-311.
3. (Braglia y Zavanella, 2003) Braglia, M y Zavanella, L. E. (2003). "An Industrial Strategy for Stock Management in Supply Chain: Modelling and Performance Evaluation". *International Journal of Production Research*, Forthcoming.

4. (Carter y Ferrin, 1995) Carter J. R. y Ferrin B. G. (1995). "The Impact of Transportation Costs on Supply Chain Management". *Journal of Business Logistics*; vol. 16 (1), pp.189-212.
5. (Chan y Kingsman, 2003) Chan, C. K., y Kingsman, B. G. (2003). Co-ordination in a Single-Vendor Multi-Buyer Supply Chain by Synchronizing Ordering and Production Cycles. Working Paper, Department of Applied Mathematics. The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong.
6. (Chang y Tsai, 2002) Chang, Wen-Jen y Chich-Hung Tsai (2002). "A Two-Echelon Inventory Model for Single-Vender and Multi-Buyer System Through Common Replenishment Epochs". *International Journal of the Computer, the Internet and Management*; vol. 10, num. 3, pp. 48- 61.
7. (Choi, *et al*, 2004) Choi, Lei, Wang y Fan Cx (2004). "Channel Coordination with Price-Quality Sensitive Demand and Concave Transportation Cost". Working Paper on Rutgers Center Operations Research.
8. (Constable y Whybark, 1978) Constable, G. K. y Whybark, D. C. (1978). "The Interaction of Transportation and Inventory Decisions". *Decision Sciences*; vol. 9, pp. 688-699.
9. (Davis, 1993) Davis, T. (1993). "Effective Supply Chain Management". *Sloan Management Review* (Summer); pp. 35-46.
10. (Dong y Xu, 2002) Dong, Yan y Xu, Kefeg (2002). "A Supply Chain Model of Vendor Managed Inventory". *Transportation Research Part E*; vol. 38, pp. 75-95.
11. (Dong, *et al*, 2001) Dong, Yan, Dressner, M. y Shankar, V. (2001). "The Impact of Efficient Replenishment and Continuous Replenishment on Supply Chain Outcomes". Documento de trabajo, Disponible en: <http://bmg2-notes.umd.edu/Faculty/KM/papers.nsf/6de61a84f4107c9d852567f2006c7c0e/cf6fb3d37c2a411a85256b640054613f?OpenDocument>.
12. (Eskigun, et al, 2005) Eskigun, E, Uzsoy, R, Preckel, P, Beaujon, G, Krishnan, S, y Tew, J. (2005). "Outbound Supply Chain Network Design with Mode Selection, Lead Times and Capacited Vehicle Distribution Centers". *European Journal of Operations Research*; vol. 165, pp. 182-206.
13. (Fisher, *et al*, 1994) Fisher, M. L., Hammond, J. H., Obermeyer, W. R., y Raman, A. (1994). "Making Supply Meet Demand in an Uncertain World". *Harvard Business Review*; vol. 72(3) pp. 83-93, May-June.
14. (Fukuda, 1964) Fukuda, Y. (1964). "Optimal Policies for the University Problem with Negotiable Leadtime", *Management Science*; vol. 10, pp. 607-708.
15. (Gaytán y Pliego, 2002) Gaytán, J. y Pliego, B (2002). "Vendor - Multibuyers Coordination through Common Replenishment Epochs Under Dynamic Demand". *INFORMS*, San Jose, California, USA; pp. 17-20.
16. (Gentry, 1995) Gentry, Julie (1995). "Role of Carriers in Buyer/Supplier Strategic Alliances". Center for Advanced Purchasing Studies-CAPS.
17. (Goyal y Gupta, 1989) Goyal, S. K. y Gupta, Y. P. (1988). "Integrated Inventory Models: the Buyer-Vendor Coordination". *European Journal of Operations Research*, vol. 41, pp. 261-269.
18. (Goyal, 1976) Goyal, S. K. (1976). "An Integrated Inventory Model for a Single Supplier-Single Customer Problem". *International Journal of Production Research*; vol. 15(1), pp. 107-111.
19. (Goyal, 1988) Goyal, S. K. (1988). "A Joint Economic-Lot-Size Model for Purchaser and Vendor: A Comment". *Decision Sciences*; vol. 19, pp. 236-241.
20. (Graves, *et al*, 1993) Graves, S, Rinnooy Kan, A. y Zipkin, P. (Eds.). (1993). "Logistics of Production and Inventory". (vol. 4). Amsterdam: Elsevier (North-Holland).
21. (Hadley y Whitin, 1963) Hadley, G. y Whitin, T. M. (1963). "Analysis of Inventory Systems". Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
22. (Hill, 1997) Hill, R M. (1997). "The Single-Vendor Single-Buyer Integrated Production-Inventory Model with a Generalized Policy. *European Journal of Operational Research*; vol. 97, pp. 493-499.

23. (Hill, 1999) Hill, R. M. (1999). "The Optimal Production and Shipment Policy for a Single-Vendor Single-Buyer Integrated Production-Inventory Problem". *International Journal of Production Research*; vol. 37, pp. 2463-2475.
24. (Hoque y Goyal, 2000) Hoque, M. A. y Goyal, S. K. (2000). "An Optimal Policy for a Single-Vendor Single-Buyer Integrated Production-Inventory System with Capacity Constraint of the Transport Equipment". *International Journal Production Economics*; vol. 65, pp. 305-315.
25. (Jayaraman, 1998) Jayaraman, Vaidyanathan (1998). "Transportation, Facility Location and Inventory Issues in Distribution Network Design". *International Journal of Operations & Production Management*; vol. 18, num. 5, pp. 471-494.
26. (Jiménez, 2005) Jiménez S. J. Elías (2005). "Estado del arte de los modelos matemáticos para la coordinación de inventarios en la cadena de suministro". Universidad Politécnica de Valencia. Documento de trabajo-Trabajo de investigación, como parte del programa Doctoral "Gestión de la Cadena de Suministro e Integración Empresarial" (Documento inédito).
27. (Johnson y Pyke, 1999) Johnson, M. Eric y Pyke (1999). "Supply Chain Management". The Tuck School of Business, Dartmouth College, Hanover, NH 03755. 603 (646) 2136.
28. (Khouja, 2003) Khouja, Moutaz (2003). "Optimizing Inventory Decisions in a Multi-Stage Multi-Customer Supply Chain". *Transportation Research. Part E*, pp. 193-208.
29. (Kim, *et al*, 2002) Kim, B., Leung, J.M.Y, Park, K. T; Zhang, G, y Lee, S. (2002). "Configuring a manufacturing Firm's Supply Network with Multiple Suppliers". *IIE Transactions*; vol. 34 (8), pp. 663-677.
30. (Klastorin, *et al*, 2002) Klastorin, T. D, Moinzadeh, Kamran y Son, Joong (2002). "Coordinating Orders in Supply Chains through Price Discounts". Working paper. <http://faculty.washington.edu/kamran/TimingDiscPaper.pdf>.
31. (Lau y Lau, 1994) Lau, Hon-Shiang y Lau, Amy Hing-Ling (1994). "Coordinating two Suppliers with of Offsetting Lead Time and Price Performance", *Journal of Operations Management*; vol. 11, pp. 327-337.
32. (Lee y Nahmias, 1993) Lee, H. L., y Nahmias, S. (1993). "Single-Product, Single-Location Models". In S. Graves, A. Rinnooy Kan, y P. Zipkin (Eds). "Logistics of Production and Inventory". (vol. 4, pp. Chapter 1). Amsterdam: Elsevier (North).
33. (Lee y Rosenblatt , 1986) Lee, H. L., y Rosenblatt, M. J. (1986). "A Generalized Quantity Discount Pricing Model to Increase Supplier's Profits". *Management Science*; vol. 32, pp. 1177-1185.
34. (Lei, *et al*, 2003) Lei, Lei, Wang, Quiang y Fan, Chunxing (2003). "Optimal Business Policies for a Supplier-Transportater-Buyer Channel with a Price-Sensitive Demand". Rutgers Center Operations Research. Research Report RRR-40-2003.
35. (Li, *et al*, 1996) Li, Susan X. Huang, Zhimin y Asheley, Allan (1996). "Improving Buyer-Seller System Cooperation through Inventory Control". ELSEVIER; *International Journal Production Economics*; vol. 43, pp. 37-46.
36. (Lu, 1995) Lu, L. (1995). "A One Vendor Multi-Buyer Integrated Inventory Model". *European Journal Operational Research*; vol. 81, num. 2, pp. 312-322.
37. (Mishra, 2004a) Mishra, Ajay K (2004). "Selective Discount for Supplier-Buyer Coordination Using Common Replenishment Epochs". *European Journal of Operational Research*; vol153, pp. 751-756.
38. (Mishra, 2004b) Mishra, Ajay K. (2004). "Channel Coordination in a Three-level Supply Chain: Quantity Discounts, Franchise Fees, Volume Discounts, and Revenue Sharing". School of Management, State University of New York, Binghamton, NY 13902, U.S.A.
39. (Monahan, 1984) Monahan, J. P. (1984). "A Quantity Discount Pricing Model to Increase Vendor's Profits", *Management Science*; vol. 30, pp. 720-726.
40. (Munson y Rosenblatt, 2001) Munson, Charles L. y Rosenblatt, Meir J, (2001). "Coordinating a Three-Level Supply Chain with Quantity Discounts". *IIE Transactions Publisher*, Issue: vol 33, num. 5, pp. 371-384.

41. (Nahmias, 1999) Nahmias, Steven (1999). "Análisis de la producción y las operaciones". CECSA, México.
42. (Piplani y Viswanathan, 2004) Piplani, Rajesh y Viswanathan, S. (2004). "Supply Chain Inventory Coordination through Multiple, Common Replenishment Epochs and Selective Discount". *International Journal of Logistics*, Publisher: Taylor & Francis; vol. 7, num. 2, pp 109-118, June.
43. (Qu, *et al*, 1999) Qu, Wendy W, Bookbinder, James H. y Iyogun, Paul (1999) "An Integrated Inventory-Transportation System with Modified Periodic Policy for Multiple Products". *European Journal of Operational Research*; vol. 115, pp. 254-269.
44. (Reyes y Gaytán, 2003) Reyes y Gaytán (2003). "La coordinación del abastecimiento a través de épocas comunes de resurtido, evaluando dos modos de transporte". Tesis presentada para obtener el grado de Maestro en Ciencias con la Especialidad en Sistemas de Calidad y Productividad. Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey, Campus Toluca.
45. (Robinson y Lawrence, 2004) Robinson Jr. E. Powell y Lawrence, F. Barry (2004). "Coordinated Capacitated Lot-Size Problem with Dynamic Demand: A Lagrangian Heuristic". *Decision Science*; vol. 35, num. 1, pp. 25-53.
46. (Sethi, *et al*, 2005) Sethi, Suresh T, Yan, Houmin, Zhang, Hanqin, Gallego, Guillermo y Huang, Ying (2005). "Periodic Review Inventory Model with Three Delivery Modes and Forecast Updates". *Journal of Optimization Theory and Applications*; vol. 124, num. 1, pp. 137-155.
47. (Silver, 1979) Silver, E. A. (1979). "Coordinated Replenishment of Item under Time-Varying Demand: Dynamic Programming Formulation". *Naval Research Logistics Quarterly*; vol. 26(1), pp. 141-151.
48. (Silver, *et al*, 1998) Silver, E. A., Pyke, D. F., y Peterson, R. (1998). "Inventory Management and Production Planning and Scheduling". (3 ed.). New York: John Wiley & Sons.
49. (Sucky, 2002) Sucky, Eric (2002). "A Single Buyer-Single Supplier Bargaining Problem with Asymmetric Information. Theoretical Approach and Software Implementation". IEEE. Computer, Society. Department of Supply Chain Management, Goethe-University, Mertonstr. 17, 60054 Frankfurt, Germany.
50. (Toptal, 2003) Toptal, Ayşgöl (2003). "Generalized Models and Benchmarks for Channel Coordination". Dissertation, Texas A&M University, Doctor of Philosophy.
51. (van Eijs, 1994) van Eijs, M. J. G. Van (1994). "Multi-item Inventory Systems with Joint Ordering and Transportation Decisions". *International Journal Production Economics*; vol. 35, pp. 285-292.
52. (Villareal, 2005) Villareal, Bernardo (2005). "Integración y coordinación logística". Universidad de Monterrey. Página web: <http://www.udem.edu.mx/paso/academico/profesorado/101411/logistica/presentaciones/integracion/INTEGRACION.ppt>.
53. (Viswanathan y Piplani, 2001) Viswanathan, S. y Piplani, Rajesh (2001). "Coordinating Supply Chain Inventories through Common Replenishment Epochs". *European Journal of Operational Research*; vol. 129, pp. 277-286.
54. (Ward y Zhai, 2004) Ward, J. E. y Zhai, X. (2004). "Joint Transportation-and-Inventory Problems in Supply Chains: A Review". Submitted to *Transportation Science*. Página web: <http://www.mgmt.purdue.edu/faculty/lee/Papers/Working%20Papers/JTIP.pdf>.
55. (Woo, *et al*, 2001) Woo, Y.Y, Hsu, S. L, y Wu, S. (2001). "An Integrated Inventory Model for a Single Vendor and Multiple Buyers with Ordering Cost Reduction". *International Journal of Production Economics*; vol. 73, pp. 203-215.
56. (Zhang, 1996) Zhang, V. L. (1996). "Ordering Policies for an Inventory System with Three Supply Modes". *Naval Research Logistics*; vol. 43, pp. 691-708.
57. (Zhao, *et al*, 2004) Zhao, Qiu-Hong, Wangb, Shou-Yang, Laic, K. K. y Xiaa, Guo-Ping (2004). "Model and Algorithm of an Inventory Problem with the Consideration of Transportation Cost". *Computers & Industrial Engineering*; vol. 46, pp. 389-397.

Capítulo 4

El sector de la automoción y su gestión en el suministro de las autopartes

4.1 Introducción

A nivel internacional, el sector industrial en general, y en particular el sector de la automoción y de las autopartes, desde los años setenta ha experimentado un proceso de evolución profundo y acelerado, el cual ha impactado de manera importante en la economía mundial, y en especial, en los países en vías de desarrollo. Entre las principales características observadas a escala mundial, se destaca la mayor globalización de las actividades económicas sobre la expansión del flujo de comercio internacional, la apertura de los mercados financieros y una mayor transferencia de tecnología, paralelamente a una fuerte tendencia creciente hacia la “transnacionalización” de los agentes económicos (Maceira, 2003).

Las grandes compañías ensambladoras como Daimler Chrysler, Ford, General Motors, Volkswagen [y otros], conocidos también como Fabricantes de Equipo Original (*Original Equipment Manufacturer, OEM`s*, por sus siglas en inglés) han planteado sus estrategias de suministro para lograr el menor coste de producción a nivel global.

Desde la perspectiva de la producción global, este conjunto de empresas ha traído consigo nuevos modelos de articulación logística de la producción, los cuales han permitido controlar el grado de dependencia e independencia en un contexto de integración horizontal con cada miembro del sistema de producción altamente fragmentado. En palabras de Bianchi y Lee (1999), “...se observa que como resultado de la fragmentación de la producción, se origina automáticamente un proceso intenso de “tercerización” (*outsourcing*) de la producción, intensificando la conformación de redes empresariales integradas por medio de cadenas logísticas de suministro”.

En el sector de la automoción en particular, los nuevos esquemas de articulación logística exigen que todos los eslabones de la cadena operen sobre la base de un sistema homogéneo de producción, sujetándose a especificaciones uniformes y utilizando partes, piezas e insumos intermedios adquiridos en cualquier lugar del mundo. En este

sentido, la disponibilidad de los componentes automotrices en el sitio de ensamble, la gestión del suministro y el control de los inventarios, adquiere importancia primordial.

Por lo anterior, este capítulo tiene como objetivo principal, presentar las tendencias mundiales del sector de la automoción para efecto de conocer el medio ambiente operativo de la gestión y administración logística del suministro de las autopartes. La idea final es establecer el ámbito de aplicación de los modelos desarrollados para la coordinación de inventarios que se proponen en el capítulo 5. Cabe señalar que la descripción general del sector de la automoción, se lleva a cabo con énfasis en el contexto empresarial mexicano.

En términos generales, este capítulo está organizado por seis apartados principales. El primero, induce la idea general que se persigue; el segundo, analiza las tendencias mundiales del sector de la automoción, su dinámica, los factores de la demanda y las estrategia de gestión empleadas por los ensambladores de automóviles; el tercero, presenta la estructura y funciones de los miembros de la cadena de suministro, se destacan los modelos de aprovisionamiento empleados por los proveedores; el cuarto, especifica la gestión operativa de la cadena de suministro del sector de la automoción, en donde se definen las relaciones espaciales y las prácticas actuales de aprovisionamiento de componentes automotrices; por su parte, en el apartado cinco, se describen las características macroeconómicas de la industria terminal y del sector de las autopartes en México, que incluye un análisis de la operatividad del sector automoción de este país; al final, se presentan las conclusiones de este capítulo.

4.2 Tendencias recientes del sector de la automoción

El sector de la automoción se ha convertido en una de las industrias más dinámicas en la era moderna, y su importancia fundamental, sin lugar a dudas, reside en el efecto social y económico que provoca. Por este motivo, resulta de interés conocer el estado actual y las tendencias recientes de esta industria.

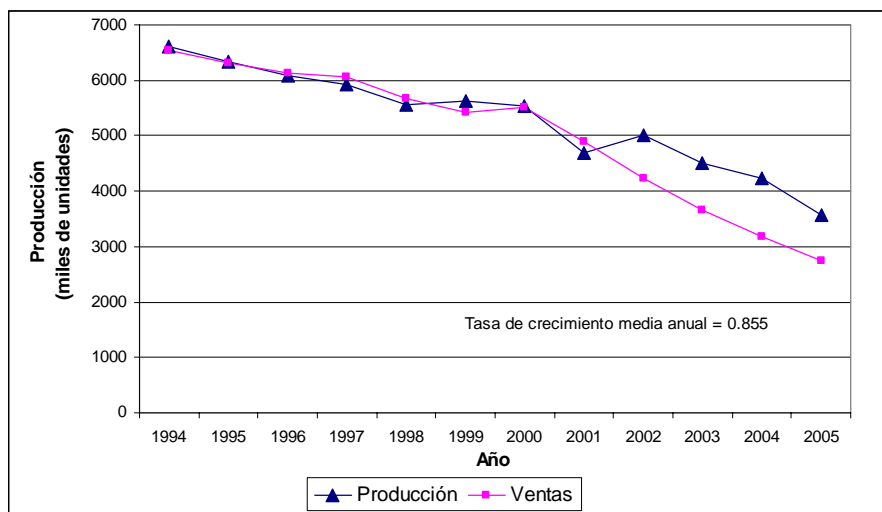
4.2.1 Dinámica de los mercados internacionales

Durante los últimos diez años, el sector de la automoción ha sufrido una profunda transformación que ha llevado a las grandes compañías ensambladoras, a aportar directamente cada vez menor proporción de valor añadido al proceso de fabricación de

vehículos automotor. Así, según el diario alemán Handelsblatt, mientras en 1995 contribuían en un 40%, en la actualidad lo hacen con el 25% (Sachon y Albiñana, 2004).

Dicha transformación ha introducido al sector de la automoción en una dinámica de muy alta competitividad, afectado por diversos factores. Por ejemplo, Veloso y Kumar (2002) señalan que uno de los principales factores competitivos es el patrón que presenta la demanda para los nuevos automóviles. Establecen que en algunas regiones de la triada (Oeste de Europa, Japón y los Estados Unidos), desde hace más de una década, los ensambladores de automóviles han estado enfrentando un mercado maduro, con una demanda estancada, con la proliferación y diversificación de productos, y con el precio muy restringido debido a la competencia.

De acuerdo con los datos estadísticos del *Bureau of Transportation Statistics*, desde 1995 hasta el año 2005, la demanda de coches nuevos ha estado creciendo en promedio menos de 1.0% anual; Veloso y Kumar (2002) pronostican que esta tendencia es posible que continúe. Al mismo tiempo, afirman que esta posición, es particularmente sensible en los mercados de los Estados Unidos, donde el número de nuevos automóviles vendidos virtualmente se ha visto reducido (véase figura 4.1).



Notas: (1) Las cifras de ventas que superan la producción, se debe a los inventarios de años anteriores. (2) La producción del año 2005 y las ventas de los años 2002, 2003, 2004 y 2005, son cifras estimadas de acuerdo a la tasa de crecimiento media anual.

Figura 4.1
Producción de automóviles y ventas en los Estados Unidos

Fuente: elaboración propia con cifras del *Bureau of Transportation Statistics*. Table 1-15: Annual U.S. Motor Vehicle Production and Factory (Wholesale) Sales.

En términos generales, la evolución que presenta el mercado de los Estados Unidos se debe en parte a la altísima competitividad que enfrentan los ensambladores de automóviles norteamericanos. Veloso y Kumar (2002), señalan que durante las pasadas dos décadas, éstos han perdido más del 20% del mercado doméstico ante las compañías japonesas y coreanas. Argumentan que en Europa se ha experimentado una tendencia similar, aunque en menor medida debido a las estrictas regulaciones sobre la participación de los ensambladores japoneses en la región.

Lo anterior, también se ha visto reflejado en la participación mundial de la producción. Según datos del *Bureau of Transportation Statistics*, en 1961 los Estados Unidos producían el 48% de vehículos a nivel mundial, cuatro décadas más tarde (2004), su participación se ha reducido hasta un 10%. Japón, por su parte, aumentó su participación del 2% al 20% en ese mismo período (véase cuadro 4.1). Países como España, Brasil, Corea del Sur y China, durante este período parece haber captado las pérdidas mostradas por los Estados Unidos, logrando tasas de participación cada vez más grandes. En dicho cuadro, puede observarse que la reestructuración del mercado permite distinguir países ganadores y perdedores.

Cuadro 4.1
Participación porcentual en la producción mundial de
automóviles en los países seleccionados

País	1961	1971	1981	1991	2001	2004
Países perdedores						
Estados Unidos	48.5%	32.5%	22.8%	15.4%	12.2%	9.9%
Reino Unido	8.8%	6.6%	3.5%	3.5%	3.7%	3.8%
Italia	6.1%	6.4%	4.6%	4.6%	3.2%	1.9%
Alemania	15.8%	14.5%	13.7%	13.3%	13.2%	12.1%
Francia	8.7%	10.2%	9.5%	9.0%	7.9%	6.8%
México	Ne	0.6%	1.3%	2.0%	2.5%	1.8%
Países ganadores						
Japón	2.2%	14.1%	25.4%	27.6%	20.2%	20.4v
China	Ne	Ne	Ne	0.2%	1.8%	5.4%
España	0.5%	1.7%	3.1%	5.5%	5.5%	5.6%
Brasil	0.9%	1.3%	1.5%	2.0%	3.7%	4.1%
Corea del Sur	Ne	Ne	0.3%	3.3%	6.4%	4.8%
India	0.2%	0.2%	0.2%	0.5%	1.4%	2.2v
Total mundial ⁽¹⁾	11,391	26,453	27,407	35,287	40,144	42,832

Nota: (1) Total mundial en miles de unidades. Ne = No existe.

Fuente: elaboración propia con datos del *Bureau of Transportation Statistics*. Table 1-15: Annual U.S Motor Vehicle Production and Factory (Wholesale) Sales.

De manera particular, el caso de México puede considerarse como un país perdedor debido a que su planta productiva no ha sabido aprovechar las ventajas comparativas, y ha perdido terreno ante las ventajas competitivas que han desarrollado otros países. Compárese contra España, Brasil y por supuesto, China. Además, su

participación porcentual en la producción mundial se podría considerar muy baja, teniendo en cuenta el tamaño de su economía y el mercado.

Por el lado de las ventas, el cuadro 4.2 permite observar que el crecimiento más importante ahora se presenta en las regiones en desarrollo como Sudamérica, Asia y el Este de Europa quienes lideran esta tendencia. Dicho cuadro muestra también cómo la demanda de vehículos en los países de la triada se encuentra estancada y cómo se ha presentado un repunte en los mercados emergentes.

Cuadro 4.2
Ventas mundiales de automóviles por región (miles de unidades)

Región	1997	1999	2001	2003 /ef	TCMA (1997- 2000)
Triada	37,369.0	40,531.5	40,467.8	39,106.0	0.8%
Estados Unidos	15,498.0	17,415.0	17,472.0	16,967.0	1.5%
Oeste de Europa	15,146.0	17,255.0	17,089.0	16,332.0	1.3%
Japón	6,725.0	5,861.5	5,906.8	5,807.0	-2.4%
NAFTA	17,425.0	19,663.0	20,016.0	19,592.0	2.0%
Estados Unidos	15,498.0	17,415.0	17,472.0	16,967.0	1.5%
Canadá	1,423.0	1,540.0	1,598.0	1,625.0	2.2%
México	503.0	708.0	946.0	999.0	12.1%
Sudamérica	2,353.0	1,671.0	1,912.0	1,608.0	-6.1%
Asia-Pacífico	6,484.0	6,053.0	7,156.0	9,645.0	6.8%
Este de Europa	2,057.0	2,464.0	2,206.0	2,245.0	1.5%
Otros países	367.0	295.0	367.0	365.0	-0.1%
Países emergentes ⁽¹⁾	13,187.0	12,731.0	14,185.0	16,487.0	3.8%
Total mundial	50,556.0	53,262.5	54,652.8	55,593.0	1.6%

Nota: (1) Incluye automóviles vendidos en México y Canadá.

/ef = estimado por la fuente.

Fuente: elaboración propia con datos de "Auto Report, 2004" (IMF, 2004).

A partir del informe "Auto Report 2004" de la *International Metalworkers' Federation*, se ha podido observar que las ventas de automóviles fuera de la triada han superado los 16 millones de vehículos en el 2003, representando alrededor del 26% del total de las nuevas ventas a nivel mundial, a una tasa de crecimiento media anual de 3.8%. Antes, Veloso y Kumar (2002) ya habían estimado que para el 2010, dicha participación puede ascender hasta el 40%. Por ejemplo, en 1980 el promedio anual de ventas de automóviles en los Estados Unidos fue de 20 millones de unidades, reduciendo su número a un poco más de 15 millones de vehículos en 1997. El patrón que sigue estas cifras, muestra un contraste muy importante de los Estados Unidos con respecto a la región Asia-Pacífico que presenta una tasa de crecimiento media anual de alrededor del 7%.

Para la región del NAFTA, las ventas para México y Canadá han mostrado una tasa creciente entre 1997 y 2002, contrayéndose en el 2003, debido principalmente a la recesión económica de los Estados Unidos entre 2001 y 2003, cuyas cifras han mostrando tasas negativas en ese período, logrando en promedio apenas el 1.6%, a pesar del repunte que tuvo en 1999. El cuadro 4.3 muestra otras regiones que han presentado tasas de crecimiento muy importantes, que incluso superan con bastante holgura la región del NAFTA.

Para el caso de México, se observa que en pocos años ha duplicado las ventas de automóviles nuevos; en 1997 apenas se comercializaban alrededor de 503 mil autos por año; para el 2002 esta cifra ascendió a más de un millón de vehículos. Ciertamente, la flexibilidad de los programas de financiamiento recientemente impulsados, y aún con la débil estabilidad económica mexicana, puede estimarse que el consumo de los últimos años podría sostenerse.

Cuadro 4.3
Participación mundial de las ventas anuales de automóviles
para los países seleccionados

Año	1998	1999	2000	2001	2002	2003 /ef	Promedio
Asia Pacífico							
Japón	2.3%	-14.8%	2.2%	-1.4%	-1.9%	0.3%	-2.3%
China	1.5%	15.8%	14.0%	16.0%	34.1%	35.2%	19.3%
India	-8.0%	27.1%	2.1%	-3.6%	3.2%	13.5%	5.6%
Tailandia	-60.3%	51.5%	20.1%	13.3%	39.0%	10.3%	10.2%
Australia	11.5%	-2.6%	0.0%	-1.9%	6.8%	10.5%	4.0%
Oeste de Europa							
Alemania	6.2%	2.5%	-10.5%	-1.5%	-3.2%	-0.6%	-1.2%
Francia	13.2%	10.2%	1.1%	5.4%	-5.3%	-6.3%	3.0%
España	16.8%	22.5%	-2.4%	2.3%	-6.5%	4.8%	6.1%
Inglaterra	4.0%	-2.2%	1.4%	10.0%	4.1%	2.1%	3.2%
NAFTA							
Estados Unidos	3.0%	9.1%	2.3%	-1.9%	-1.9%	-1.0%	1.6%
Canadá	0.4%	7.8%	3.0%	0.8%	8.4%	-6.2%	2.3%
México	32.6%	6.1%	27.7%	4.6%	6.3%	-0.7%	12.6%
Este de Europa							
Polonia	-3.4%	35.0%	-25.3%	-31.4%	-5.7%	16.8%	-3.0%
Eslovenia	24.7%	-17.4%	-28.6%	8.5%	22.4%	15.9%	3.7%
Hungría	41.1%	13.9%	1.6%	-2.2%	15.2%	11.6%	13.4%
Sudamérica							
Brasil	-8.8%	-17.9%	19.1%	8.2%	-6.8%	-0.8%	-1.4%
Argentina	6.8%	-16.5%	-19.3%	-42.4%	-53.4%	31.0%	-16.9%

Nota: ef = estimado por la fuente

Fuente: elaboración propia con datos de "Auto Report, 2004" (IMF, 2004).

Con base en el nuevo esquema de re-configuración de la producción y el consumo de automóviles en las diferentes regiones del mundo, puede observarse claramente el sesgo empresarial que se está formando. Dicha tendencia genera un conjunto de requerimientos para las empresas de este sector que deben ser capaces de responder para ser competitivos.

De acuerdo con Veloso y Kumar (2002), la madurez de los países de la triada y el crecimiento de los países en desarrollo han llevado a un aumento diversificado de las necesidades del mercado, las cuales forman parte de dicho requerimientos y actúan como factores de cambio en la evolución del sector. Fine, *et al.* (1996) reconocen que los consumidores han desarrollado expectativas particulares en lo que se refiere a las características del vehículo, funcionamiento y seguridad; y que además, ha promovido la reestructuración de los mercados, nuevas estrategias de producción y el desarrollo de nuevos esquemas para la comercialización de los automóviles.

4.2.2 Los factores del mercado que han revolucionado el sector

Muchos son los factores que afectan la toma de decisiones en el mundo del automóvil. Las preferencias de los consumidores determinan el tipo, confiabilidad, y funcionamiento de los vehículos (Sabrià, *et al.*, 2004). Las estrategias gubernamentales sobre el comercio exterior, seguridad, y el marco jurídico del medio ambiente establecen los requerimientos para modernizar y cambiar el diseño y los sistemas de producción de los automóviles. La rivalidad, competitividad y las estrategias de las compañías automotrices contribuyen de igual manera en la investigación, diseño, innovación y cambio en los procesos de fabricación.

Por el lado de la preferencia de los consumidores, Veloso y Kumar (2002) reportan que en mercados emergentes, las características de índole social, la estructura de los impuestos gubernamentales, y el nivel de ingreso de los habitantes, también generan necesidades diversas en los automóviles. Por ejemplo, la selección de vehículos en la República de China y Tailandia son económicos, pequeños “pick up” y furgoneta; en Malasia, las mini furgonetas son las más vendidas; en Brasil el 1000cc es el coche líder; en México, los coches pequeños y medianos son los más preferidos, en contraste con los Estados Unidos que buscan coches más lujos y grandes, pero con alto rendimiento.

En un estudio realizado hace una década sobre la industria automotriz en Norteamérica (Flynn, *et al*, 1996), pronosticaron que los mercados serían más heterogéneos en las próximas décadas debido a que los ensambladores esperan un aumento de automóviles personalizados; y además, identificaron que las ventas a consumidores de género femenino y grupos étnicos minoritarios se incrementarían. Concluyeron que la función y estilo del vehículo reflejarían las preferencias de los consumidores; por tanto, la industria del automóvil sería más agresiva para capitalizar las oportunidades de ventas que ofrecen dichas demandas. El conjunto de todos estos nuevos paradigmas recayó en un nuevo modelo de producción llamado “*personalización en masa*” (*Mass Customization*) (veáse, Pine, 1992; Anderson y Pine, 1997).

Por los argumentos antes señalados, puede observarse que la necesidad de responder a un incremento en las expectativas de los consumidores, localizados en un mayor número de mercados, genera una gran proliferación de segmentos y modelos. Simplemente en los anuncios publicitarios puede advertirse que el gran número de modelos de vehículos ofrecidos en el mercado prácticamente se ha visto multiplicado; además, una gran cantidad de características personalizadas son agregadas a los diferentes modelos, por ejemplo, potencia, velocidad de crucero, controles internos automatizados, Internet y GPS, vehículos híbridos con tracción manual y automática, etc.

Por lo que respecta a las regulaciones gubernamentales, éstas también han jugado un papel importante en el diseño de los vehículos, sobre todo en aspectos relacionados con la seguridad, a partir de una reglamentación jurídico-administrativa inflexible. Esto ha motivado el diseño de ciertos dispositivos especiales de seguridad en los vehículos, tales como los cinturones de seguridad y bolsas de aire con sistemas contra choque (*airbags*). Además de exigir altos niveles de calidad en el diseño del sistema de frenado.

Otra área en donde el gobierno ha sido muy activo, está relacionado con el daño al medio ambiente. Las leyes emitidas por los gobiernos de los países, se han enfocado hacia el control de las emisiones contaminantes y al ruido. En México, un programa más rígido sobre este tema fue impuesto en 1989, al no permitir la circulación de los vehículos en la ciudad de México un día a la semana y tener que someter a todo

vehículo automotor a verificaciones anticontaminantes, al menos dos veces al año. Dispositivos como el convertidor catalítico son un claro ejemplo de los nuevos componentes que requieren los automóviles.

Por supuesto, otro de los factores que determinan el curso de la industria es la tecnología. Históricamente, la fuerza principal que subyace en la instrumentación tecnológica, ha estado basada en las demandas de los consumidores por mejorar el funcionamiento y la confiabilidad de las unidades.

En años recientes, las mejoras tecnológicas han estado orientadas hacia áreas tales como la seguridad, reducción del impacto ambiental, y adicionalmente, a características no relacionadas con la operación del vehículo, tales como sistemas de estereofonía y ayudas a la navegación. Algunos ensambladores de automóviles, recientemente emplearon tecnologías de innovación como una estrategia para aumentar la penetración del mercado de algunos modelos en particular. Por ejemplo, la puesta en marcha de vehículos híbridos en la actualidad, ya es un resultado de estas tecnologías.

Las relaciones entre mercado y tecnología se encuentran estrechamente vinculadas afectando la evolución del automóvil. Recientemente ciertas marcas de automóviles cuentan con aplicaciones avanzadas de *Internet* que les permite entre otros lujos: comunicación a “manos libres” con soporte para las más recientes tecnologías de reconocimiento de voz y tecnologías de texto a voz, control de distracción del conductor que previene el acceso a ciertas aplicaciones y funcionalidades cuando el vehículo esta en movimiento, gráficas de alta calidad para mapas, entre otros (véase Chaparro, 2002).¹

Las nuevas tecnologías están presentes en todos los niveles de fabricación del automóvil. Las demandas para mejorar el desempeño del vehículo, mejorar la seguridad, así como reducir el impacto ambiental, lleva a numerosos desarrollos en las áreas estructurales. La estructura original de la fabricación masiva usada en los años ochentas, recientemente cambio por un sistema basado en un marco espacial y en un diseño modular compuesto (véase Hsuan, 1998).

¹ Muchos ensambladores ya están integrando lo último en tecnología en sus modelos, para mejorar la seguridad y convertir el automóvil en un centro de comunicaciones gracias a la conexión permanente a *Internet*. Volkswagen, Mercedes, BMW, Audi y otras marcas ya están ensayando los nuevos sistemas que conformarán los “coches inteligentes”: interactivos, capaces de comunicarse gracias a sistemas de radio, GPS, láser o satélite, llenos de sensores, rodeados de cámaras, transparentes, con iluminación inteligente, multimedia, con software de reconocimiento del conductor (Chaparro, 2002).

Los sistemas electrónicos también se han instrumentado en la configuración del motor y en la fuerza de tracción: juegan un papel crucial en el control del funcionamiento de este sistema. En general, los automóviles se han vuelto más dependientes de los electrónicos y menos de lo mecánico. Una multitud de sistemas eléctricos, sensores electrónicos, y dispositivos que los activan han “tomado” el control y monitoreo del funcionamiento del automóvil (Santarini, 2006). Los sistemas electrónicos son utilizados para resolver problemas y para diagnosticar el funcionamiento del vehículo, operan el sistema de navegación y proporcionar unidades de entretenimiento (Veloso, *et al.*, 2000).

Un vehículo actual, tiene el doble de funciones electrónicas que uno fabricado hace 10 años atrás. Sin embargo, también contribuyen al coste total del vehículo en alrededor del 40% de los costes totales del automóvil que involucra sistemas eléctricos y diseño de software; en cierta forma, lo electrónico es la disciplina de diseño menos automatizada en el sector de la automoción (Santarini, 2006).

La rivalidad, competitividad y las estrategias de las compañías automotrices contribuyen de igual manera en la investigación, diseño, innovación y cambio en los procesos de fabricación, propiciando un cambio importante en los paradigmas tradicionales. Pérez (2000), ilustra la forma en que el paso desde el paradigma de la producción en serie al modelo de redes flexibles ha transformado los criterios de gestión en todos los campos, desde la selección y diseño del producto, pasando por las estructuras organizacionales, hasta los nodos de funcionamiento y las relaciones con el personal (véase figura 4.2).

En tal virtud, los ensambladores han adoptado una serie de estrategias específicas, con las cuales han estado superando los inconvenientes encontrados para poder cumplir con sus expectativas y los de la demanda, condicionando y reorganizando el funcionamiento de su cadena de suministro que afecta principalmente a sus proveedores y a los proveedores de sus proveedores, tal y como se verá más adelante. Algunas de las estrategias más comúnmente empleadas, se describen a continuación.

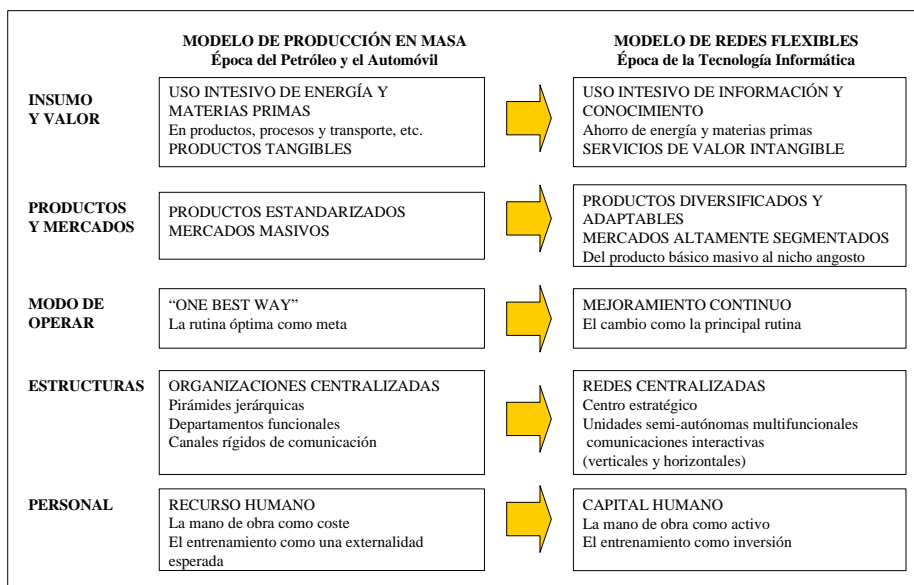


Figura 4.2
Cambio de paradigma

Fuente: Pérez (2000).

4.2.3 Estrategias de los ensambladores de automóviles

Para responder a las nuevas tendencias del mercado y la demanda, los ensambladores de automóviles están ejerciendo un conjunto de estrategias que son comunes entre las principales empresas. Álvarez (2002) identifica cinco estrategias que han estado utilizando estas compañías: *a)* adopción de una perspectiva global en las actividades de manufactura; *b)* estrategias de crecimiento interno o mediante alianzas, fusiones o adquisiciones; *c)* participación en actividades de niveles superiores de la cadena productiva como los servicios financieros; *d)* adopción de plataformas y sistemas modulares de producción y *e)* subcontratación de procesos productivos necesarios para la manufactura de automóviles que cambian las relaciones entre ensambladoras y proveedores.

a) La primera estrategia es una adopción de la perspectiva global en sus operaciones. En los años ochenta, a pesar de la presencia extranjera, la competencia entre los ensambladores de automóviles se presentaba al interior de las regiones. Las compañías norteamericanas dominan el mercado de los Estados Unidos, los japoneses el mercado asiático y los europeos su propio mercado regional. Durante los años noventa, esta estructura cambio totalmente.

Un creciente traslado de plantas al inicio de la década de los noventa ha provocado una mayor presencia de la competencia extranjera en casi todos los lugares del mundo. Este proceder particularmente se ha convertido muy importante en los mercados emergentes, en donde todas las empresas ensambladoras están disputando tenazmente los mercados compartidos y en crecimiento. Como resultado, los ensambladores de automóviles están planeando operaciones a escala global. Con nuevas inversiones, las firmas tratan de repetir la estructura de la cadena de suministro, demandando a los proveedores que estén presentes en las nuevas regiones donde ellos se ubican.

b) La segunda estrategia se refiere a que los ensambladores buscan adquirir capacidades mediante alianzas, fusiones y adquisiciones concentrado horizontalmente la industria (Daimler-Chrysler-Mitsubishi; Nissan, Dacia y Samsung-Renault), otras adquieren capacidades mediante crecimiento y aprendizaje interno (Honda, Toyota y SEAT, Skoda, Audi).

Álvarez (2002) señala que este tipo de alianzas o fusiones deberá superar no solo aspectos técnicos y de diseño, sino que el personal directivo y operativo deberá aprender a interactuar teniendo diferentes antecedentes culturales y en ocasiones deberá hacerlo en ambientes multiculturales. Cita por ejemplo que la coordinación de capacidades y competencias de este tipo, es la producción de automóviles de marca Renault en las líneas de ensamble de Nissan en México, en donde el personal francés ha tenido que adaptarse a la cultura organizacional japonesa, así como al medio ambiente y cultura mexicana.

c) Por otro lado, los ensambladores de automóviles han organizado la producción de vehículos alrededor de plataformas² y sistemas modulares de producción. De hecho, puede decirse que este tipo de estrategia es uno de los conceptos más relevantes de este sector.

El surgimiento de este tipo de plataformas se debe principalmente a la búsqueda de economías de escala en el diseño y la manufactura, a través de la reducción de los

² Una plataforma es una base común para la fabricación de diferentes tipo de vehículos, cuyo perímetro común más habitual se compone de grupo motopropulsor, la plataforma y estructura de chapa, las armaduras de asiento, la dirección (columna, armadura de volante, mecanismo de dirección), el grupo climatizador, la refrigeración del motor, los sistemas de enlace al suelo y transmisión, el sistema de escape, el depósito carburante y la arquitectura eléctrica/electrónica Álvarez (2002).

costes de preparación, con la finalidad de poder enfrentar las condiciones de competencia de un mercado que cada vez exige productos de mayor calidad, con ciclos de vida más cortos y que presentan una demanda muy diversificada.

Ante estas circunstancias, actualmente los ensambladores se han vuelto capaces de llevar a cabo el desarrollo de nuevas soluciones de manera rápida y de bajo coste sobre una gran parte del automóvil, con el fin de satisfacer las exigencias de los múltiples gustos y preferencias de los consumidores en el mundo, respondiendo al sistema jurídico legal y a los requerimientos de los clientes.

d) Por lo que se refiere a la estrategia de subcontratación de procesos productivos, necesarios para la manufactura de automóviles que combinan las relaciones entre ensambladoras y proveedores, se ha establecido un modelo genérico identificado como modular. En este proceso de producción, el automóvil es dividido en varios módulos y cada proveedor es responsable de diseñar, innovar, producir y colocar en línea de montaje su módulo.

El aumento de suministro externo de módulos y componentes en la industria de autopartes, que exige a las empresas expandir sus líneas de productos, implica avanzar hacia el diseño y fabricación de otras partes. *Lear Corporation*, inicio el abasteciendo de asientos para automóvil, y ha llegado a cubrir la totalidad de los interiores. La ampliación de sus actividades da cuenta del incremento de la heterogeneidad y el número de productos elaborados por esta compañía, por ejemplo: asientos, maquila de arneses, tapetes, aditamentos interiores y dispositivos eléctricos-electrónicos, hasta cubrir la totalidad de los interiores (Lara, *et al*, 2005).

e) Finalmente, se han diseñado estrategias que buscan una mejor asistencia en la venta, el servicio postventa y mantenimiento. Estos conceptos se han convertido en elementos claves de la marca para el cliente. De manera especial, los sistemas de financiamiento han permitido a las empresas incrementar sus ventas. Para las empresas distribuidoras y de autopartes, esto se ha visto reflejado en un aumento importante en sus utilidades; las primeras, relacionado con el servicio a las unidades, y las segundas, con una mayor participación en el abasto de autopartes y repuestos.

En definitiva, existen diferentes alternativas de cooperación entre sectores de una misma rama productiva hacia el interior de un proceso de integración. El desmantelamiento de las barreras al comercio recíproco favorece el intercambio de bienes o servicios finales de un mismo complejo productivo. El caso de vehículos automotores es un ejemplo en este sentido, donde cada país participante se especializa en determinados modelos que vende en el mercado interno y regional, y eventualmente al resto del mundo, e importa otros vehículos terminados desde el país socio. De esta manera se aprovechan las economías de escala que devienen de la especialización (Maceira, 2003).

Evidentemente, el suministro de materia prima hasta sistemas modulares, pasando por componentes y autopartes, permite observar la conformación de una cadena constituida por un conjunto de empresas interrelacionadas y coordinadas, no necesariamente localizadas en un mismo sitio, que da lugar a la conformación de cadenas de suministro internacionales. En la siguiente sección, brevemente se tratará de describir los elementos que la caracterizan.

4.3 La cadena de suministro del sector de la automoción

La cadena de suministro del sector de la automoción no es fácil de especificar. El tamaño de la industria es bastante amplio y diversificado, y sobre todo, las relaciones entre clientes y proveedores son profundamente complejas, lo cual complica su análisis. Por ejemplo, según Hahn, *et al.* (2000), la cadena de suministro de Hyundai (el primer fabricante de automóviles en Corea), tiene aproximadamente 400 proveedores directos, 2,500 proveedores de segundo rango, y un desconocido número de proveedores de tercer rango o superior.

Según Brunnermeier y Martin (1999), el hecho es que actualmente un fabricante de automóviles normalmente diseña y produce algunas de las 15,000 partes que aproximadamente componen un automóvil; otras, son abastecidos por sus proveedores directos. Los proveedores directos, al mismo tiempo, pueden tercerizar sus actividades y son abastecidos por otros sub-proveedores, y así sucesivamente. A simple vista esta descripción jerárquica parece muy simple, sin embargo, la posición de una compañía en la cadena de suministro puede diferir dependiendo del tipo de autopartes que suministra y del cliente. Por ejemplo, un proveedor directo (A, en la figura 4.3) que abastece

transmisiones automáticas a un fabricante de automóviles puede también ser un sub-proveedor que suministra indirectamente juegos de engranes a otro fabricante de automóviles. Más aún, estas compañías, especialmente los sub-proveedores, frecuentemente suministran componentes a clientes que se encuentran fuera de la industria de la automoción.

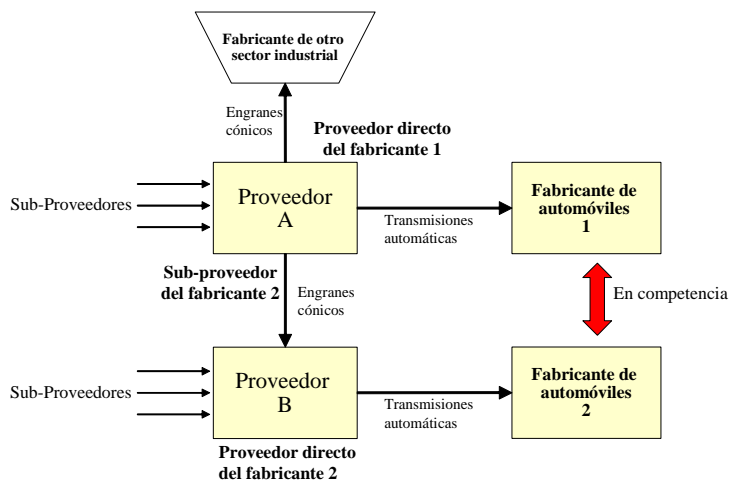


Figura 4.3
Complejidad de la cadena de suministro del sector automoción

Fine y Whitney (1996) agregan que los proveedores de herramientas, robots, ordenadores, equipo especializado de computo (*hardware*) y programas computacionales (*software*), también son parte importante de la cadena de suministro del automóvil. Si ha esto se le agrega que las distintas empresas que forman parte de esta cadena se encuentran localizadas en sitios geográficamente diferentes, la complejidad de su análisis es aún mayor.

4.3.1 Estructura y dimensiones de la cadena

No obstante lo anterior, la cadena de suministro del sector de la automoción puede ser delimitada utilizando el marco conceptual desarrollado por Lambert (2001). Este autor, señala que en la cadena de suministro existe un proceso de interrelación natural que se da a través de varias etapas (eslabones de la cadena) y que su configuración permite identificar tres elementos clave que se interrelacionan fuertemente, que son:

- a) La estructura de la cadena de suministro (red de empresas)
- b) Las dimensiones estructurales de la red
- c) Identificación de los miembros de la cadena de suministro

Lambert (2001) identifica a la estructura de la cadena de suministro, como una red de empresas que participan en una secuencia de producción y servicios desde el abasto de materias primas hasta la entrega del producto final (el automóvil) y que en realidad, ésta es más parecida a las ramificaciones de un árbol. Por esta razón, dicho autor señala que las ramificaciones conforman una estructura cuyas dimensiones están definidas por su longitud (dimensiones verticales), por el número de proveedores y clientes en cada nivel (dimensiones horizontales), y por la posición que ocupa una compañía en la cadena.

La dimensión vertical se refiere al número de niveles en la cadena de suministro. Ésta, puede ser larga o corta, según el número de niveles existentes. En ciertos casos, la estructura de la red para algunos de los módulos que conforman el automóvil es excesivamente larga. Por ejemplo, los fabricantes de textil se encuentran muy alejados de las compañías ensambladoras. Según Handfield, *et al.* (2004), el tiempo que ocurre para procesar sus materiales en el sector de la automoción es de 59 días y con un tiempo de tránsito hasta el ensamblador de 13 días, pero con 182 días de inventario. Por esta razón, argumentan que la importancia de la visibilidad de la información, es relevante para reducir el “*efecto látigo*” (*bull- whip effect*).

En la actualidad, los ensambladores de automóviles están pugnando para que su cadena de abastecimiento sea lo más corta posible, e incluso, induciendo a sus proveedores más directos para que se instalen lo más cercano a las plantas de ensamble, y estén en posibilidades de desarrollar sub-ensambles modulares. Ciertamente, la mayoría de los componentes se elaboran en diversos sitios del mundo por una gran cantidad de proveedores, los cuales remiten sus productos a centros ensambladores de los principales subsistemas de los vehículos, desplazándolos posteriormente a grandes distancias para el ensamble final.

Con respecto a las dimensiones horizontales, ésta se compone por el número de proveedores o clientes contenidos en cada nivel. Es decir, según el grado tecnológico de las compañías o tipo de producto que fabriquen, cada empresa en la cadena de suministro decidirá tener muy pocas compañías que la abastecen, o una estructura amplia con muchos proveedores y/o clientes (Lambert, 2001). En el sector de la automoción, las compañías ensambladoras prefieren tratar con el menor número de proveedores posibles en los niveles más altos, instrumentando para ello las estrategias

mencionadas en la sección anterior. Esto hace que los ensambladores se conviertan en la empresa central y el eslabón de mayor influencia en la cadena.

Por lo que se refiere a la posición de una compañía en la cadena de suministro, Lambert (2001) establece que ésta se determina a partir de la localización en la cadena con respecto al mercado principal. En este sentido, los ensambladores de automóviles, como empresa central de la cadena, han preferido estar lo más cerca del consumidor: por un lado, atendiendo las necesidades directas de los clientes, y por otro, acordando programas con distribuidores en sistemas ajustados de producción y venta (véase Womack, *et al*, 1990).

En relación a la identificación de los miembros de la cadena de suministro, Lambert (2001) señala que es muy importante su reconocimiento para hacer más comprensible el análisis. En la cadena de suministro del sector de la automoción, son identificados por la función y participación en la conformación del automóvil y se clasifican por la manera que interactúan con los ensambladores de automóviles (*empresa central*), ya sea directa o indirectamente.

De acuerdo con el *Council of Supply Chain Management Professionals (CSCMP)* (antes, *Supply Chain Council*), las compañías que forman la cadena, pueden ser clasificadas como miembros primarios (directos) y de apoyo (indirectos). Los miembros primarios son todas aquellas compañías autónomas o unidades comerciales estratégicas que llevan a cabo actividades de valor agregado, operativas o de gestión en los procesos comerciales, produciendo un rendimiento específico para un cliente en particular o mercado. Por su parte, los miembros de apoyo son las compañías que simplemente proveen los recursos, conocimientos y utilidades para los miembros primarios de la cadena de suministro. Cabe señalar que la distinción entre los miembros primarios y de apoyo de la cadena de suministro, no es muy obvia en todos los casos. Para una mejor aproximación para diferenciar los tipos de miembros, Porter (2000) hace una propuesta muy concreta distinguiendo las actividades primarias y las apoyo en su modelo de "cadena de valor".

En definitiva, puede señalarse que las cadenas de suministro del sector de la automoción están definidas por una estructura muy especial cuyas dimensiones

verticales y horizontales han marcado la pauta de este sector, basándose en la tercerización de la producción de los componentes del automóvil.

Por lo anterior, la cadena de suministro del sector de la automoción formalmente puede ser delimitada a partir de la identificación de la empresa central reconocida en este caso como ensambladores de automóviles (OEM). Cada una de estas empresas representa el eslabón principal de su cadena y están ubicadas en un mercado que se caracteriza por ser altamente concentrado y dominado por muy pocas compañías. Lamming (1993) ya anunciaba que estas empresas serían grandes compañías que ofrecerían un amplio rango de servicios al consumidor, y que asumirían la responsabilidad del desarrollo de la industria.

Los eslabones “*río arriba*” o proveedores son reconocidos como: proveedores de primer nivel (directos), segundo nivel, tercero y así sucesivamente (indirectos), que abastecen productos cada vez de menor valor añadido. El mercado de los proveedores de primer nivel es más competitivo. Existen cientos de ellos, algunos de los cuales son compañías muy grandes con ventas anuales de billones de dólares. El mercado de los sub-proveedores de segundo nivel, y de aquellos niveles más alejados, es aún más competitivo debido a que está constituido por miles de pequeñas empresas que se agregan a las pocas grandes compañías existentes en estos eslabones de la cadena.

Algunos de los proveedores de primer nivel también operan en los niveles inferiores de la cadena, ya sea por medio de la integración vertical o abasteciendo partes a sus rivales en el primer nivel (Brunnermeier y Martin, 1999). Lamming (1993), reconoció que los proveedores en esta industria serían estructurados por “niveles” diferenciados por la naturaleza de su relación de suministro con su cliente, el nivel tecnológico del producto que abastece, y la complejidad de la producción y funciones de suministro, las cuales controlen o coordinen.

Los eslabones “*río abajo*”, están compuestos por miles de distribuidores, también conocidos como “concesionarios” que tienen como función vender los automóviles a los consumidores, último eslabón de la cadena. En este nivel de la cadena de suministro, la relación entre ensambladores de automóviles (marca) y distribuidores no es del todo muy alentadora, ya que los primeros intentan conservar su control sobre los distribuidores, a los que les han impuesto sus condiciones estándares, en muchos casos

no directamente relacionados con la satisfacción del cliente o la mejora de resultados, sino con la conveniencia y el control de la propia marca. Por otra parte, los concesionarios han centrado su negociación en los márgenes, evitando el cambio de una remuneración cuantitativa (tanto por cien del valor del vehículo como descuento al concesionario) a una remuneración cualitativa, es decir, en función del cumplimiento de diferentes requerimientos y objetivos de la marca, como índices de satisfacción, valoración, etc. (López, 2002).

La figura 4.4 muestra la estructura general de una cadena de suministro del sector de la automoción, y sus componentes principales.

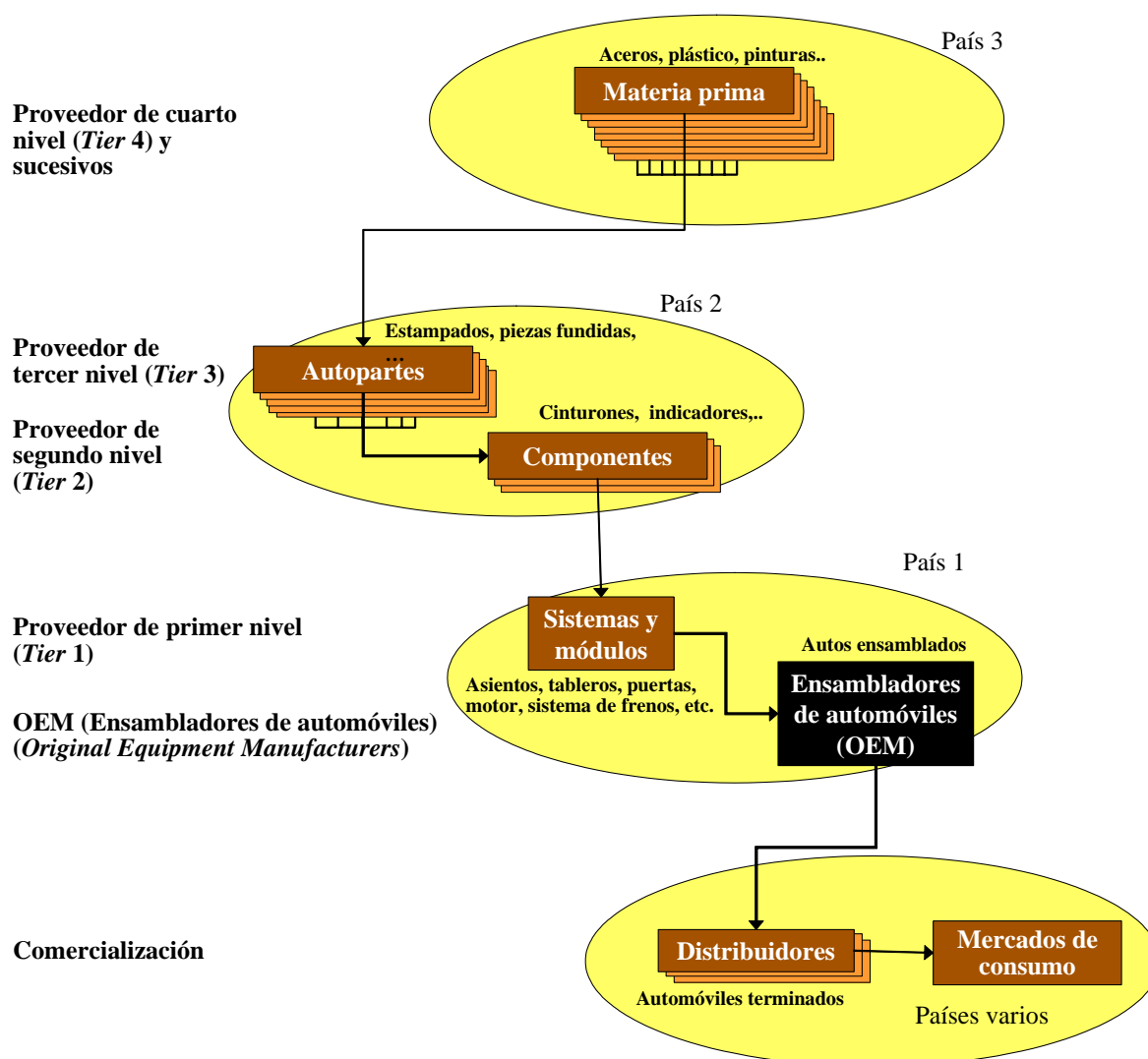


Figura 4.4
Cadena de suministro del sector de la automoción

Fuente: elaboración propia con base en Sachon y Albiñana (2004).

En términos generales, puede observarse que las características de la cadena de suministro del sector de la automoción es bastante compleja debido, principalmente, a la gran cantidad de proveedores en su estructura vertical y horizontal en los eslabones más alejados de la empresa central. Ciertamente, en el contexto mundial cada uno de los proveedores tiene una gran cantidad de variantes en cuanto a los componentes que abastecen, la localización física de sus unidades de producción y del tipo de relaciones comerciales que mantienen con sus clientes, lo que hace muy complicado caracterizar la cadena de suministro de este importante sector industrial. Cabe señalar que a diferencia de las cadenas de suministro de otros sectores, la gestión de los distribuidores autorizados es distinta, ya que éstos únicamente hace la gestión de exhibición y venta de los vehículos que son almacenados en los centros de distribución de los ensambladores (Holweg y Miemczyk, 2003).

4.3.2 Proveedores directos o de primer nivel

Por lo general, los proveedores del primer nivel (*tier 1*) se ocupan de la integración de sistemas para abastecer módulos ya ensamblados directamente a la cadena de montaje del ensamblador (Sachon y Albiñana, 2004). De acuerdo con Brunnermeier y Martin (1999), el proveedor de primer nivel de la cadena de suministro del sector de la automoción, depende de su tamaño y diversidad; puede suministrar desde una parte o alguno de los sistemas principales del automóvil. En este nivel se sitúan empresas como *Bosch, Dana, Delphi Automotive, Johnson Controls Inc.* o *Lear Corporation*, cada una con ventas de miles de millones de dólares. En general, Brown (1999) reporta que pertenecer a este grupo de empresas, es necesario tener capacidad para abastecer directamente la demanda de las plantas ensambladoras y poseer los atributos de las empresas de clase mundial.³ Es importante manifestar que este tipo de proveedores generalmente utilizan una estrategia del tipo “*justo a tiempo*” para abastecer sus productos a los ensambladores.

Murray y Dowell (1999), reconocen que este tipo de proveedores han surgido a partir de que los ensambladores prefirieron obtener todo lo relacionado a un componente

³ *Una empresa de clase mundial es considerada aquella que tiene elevados niveles de productividad, certificaciones internacionales de calidad, producción con cero defectos que se traduce en escasos reclamos de los clientes, elevados porcentajes de automatización en la producción, alta utilización de la capacidad instalada, sistemas de entrega justo a tiempo, capacidad para abastecer una elevada variedad de productos, reducidos inventarios y organización laboral en grupos o células.*

en particular de uno o dos proveedores, e incluso de proveedores que abastece a la competencia, es decir, los proveedores de primer nivel trabajan para múltiples ensambladores. Por ejemplo, Brunnermeier y Martin, (1999), señalan que TRW conduce el 23% de sus negocios con Ford y 10% con GM. Johnson Controls, obtiene 11% de sus ingresos de Crysler y 10% de Ford.

Las formas de contratación de las empresas ensambladoras han cambiado. Cada vez más contratan directamente con menos proveedores tratando de comprar partes sólo a los de este nivel, y su interés se orienta a dejar en sus manos la organización de la cadena de suministro, el diseño y ensamble de los subsistemas (Gordon, 1995).

Veloso y Kumar (2002) señalan que muchos proveedores de este nivel se están convirtiendo en grandes empresas globales, las cuales cada una se están especializando en complejos sistemas o integradores de diversos sistemas más simples. Argumentan que muchos proveedores, incluso, están buscando una mayor participación en el contenido del vehículo, suministrando grandes sistemas integrados por medio de la adquisición de competidores y fabricantes de productos relacionados, proporcionando los recursos, el financiamiento y la capacitación para servir a varias plantas globalmente.

Lo anterior, propicia una tendencia totalmente opuesta a los ensambladores de automóviles que buscan una integración horizontal; muchos de los proveedores de primer nivel están adquiriendo compañías en los niveles inferiores de la cadena, propiciando su integración vertical. Es decir, los proveedores de primer nivel se están convirtiendo en empresas integradoras de sistemas que combinan los componentes para logra sólo un producto, proporcionando un aumento en la cadena de valor del fabricante. Flynn, *et al.* (1996) reporta por ejemplo, que *Lear Corporation* adquirió a *Automotive Industries* en 1995; un año después, compró a *Masland*, un fabricante de alfombras. Similarmente, *Johnson Controls, Inc.*, adquirió a *Prince*, fabricante de componentes interiores; y *Magna International* compró a *Douglas and Lomason*, un fabricante de asientos. PricewaterhouseCoopers (1999) estima que, a escala global, hay unos 600 proveedores de este nivel.

Muchas de las grandes compañías tienen varias divisiones y ubicaciones; son responsables de abastecer varias partes, sistemas, componentes y accesorios. Al mismo

tiempo, una gran cantidad de proveedores de primer nivel también están solicitando a sus proveedores sistemas o módulos integrados, lo cual hace que vayan más allá que construir simplemente los componentes y partes basadas en las especificaciones de los ensambladores de automóviles.

4.3.3 Proveedores indirectos o sub-proveedores (segundo nivel y subsecuentes)

La gran mayoría de los proveedores que participan en la cadena de suministro no son integradores de sistemas, ni de componentes estandarizados. Frecuentemente son pequeñas empresas que trabajan en un segundo y tercer nivel de la cadena de suministro, que se caracterizan por abastecer componentes especializados. De acuerdo con Veloso y Kumar (2002), dichas empresas se dividen en dos grandes categorías: fabricantes de componentes y de sub-ensambles.

Los fabricantes de componentes, frecuentemente tienen la responsabilidad de diseñar y probar sus componentes, pero no el diseño de un sub-ensamble entero en donde dichos componentes son instalados. En casi todos los casos, un fabricante de componentes es un proveedor indirecto de los ensambladores de automóviles. Sus clientes directos son otros proveedores que están colocados en niveles más altos en la jerarquía de la cadena de suministro.

Por lo que respecta a los fabricantes de sub-ensambles, son empresas especializadas con capacidad de poder ensamblar, integrar y diseñar un proceso. Esta clase de proveedores de segundo nivel pueden abastecer la plataforma de la dirección, un sistema de pedales, y otros. Frecuentemente, esta clase de empresas eligen un subsistema como una meta y adoptan la tecnología necesaria para estar por arriba de su competencia. Por ejemplo, *Lear Corporation*, inició con el abasteciendo de asientos para automóvil como proveedor de segundo nivel, y ha llegado a cubrir la totalidad de los interiores como proveedores de primer nivel. Sin embargo, un fabricante de sub-ensambles generalmente es un proveedor indirecto, con muy pocas oportunidades de abastecer directamente a los ensambladores.

Por esta razón, Veloso, *et al.* (2000), deducen que los proveedores de segundo nivel han comenzado a registrar cambios en su estrategia de participación en la cadena de suministro. Señalando que este hecho, ha permitido que algunas empresas

incursionen hacia el abasto de componentes cada vez más elaborados, modificando su posición actual y su objetivo, tal y como se ilustran en la figura 4.5. No obstante, la situación real de la mayoría de las empresas de este nivel, es que su principal objetivo se encuentra enfocado a un pequeño proceso. En tal virtud, este enfoque solo busca desarrollar productos de bajo valor añadido en pequeñas instalaciones y en una sola ubicación con cierta eficiencia, o incluso con deficiencias en el proceso de fabricación, y bajo una estructura de negocios ajustados con limitado desarrollo de ingeniería. Algunas de las compañías importantes que pertenecen a este grupo son: *Nypro, Inc, Ganto Techologies, Lectra System Inc, ITW-Deltar, Brush Research Manufacturing Co.*

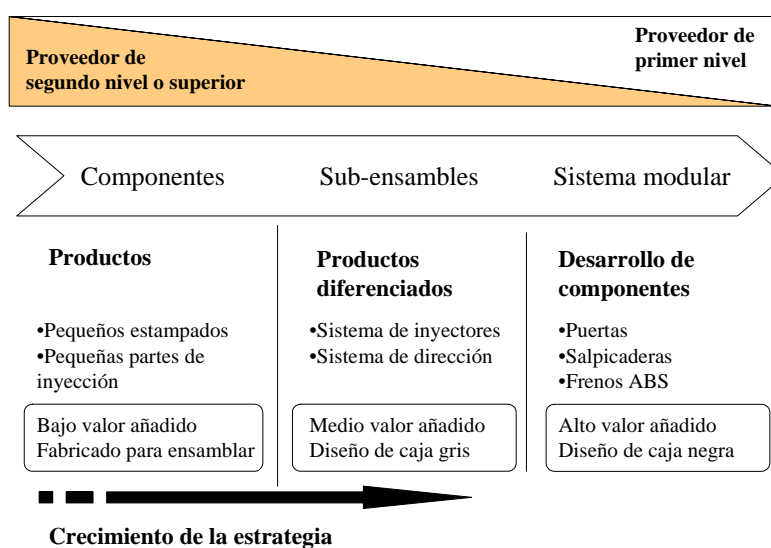


Figura 4.5
Posición de la compañía de segundo nivel en la cadena de suministro

Fuente: Veloso, *et al.* (2000).

La drástica reducción del número de proveedores de primer nivel con los cuales los ensambladores de automóviles quieren tratar, y la concentración especializada de ese tipo de proveedores en ciertas tecnologías y productos, parece provocar un aumento de la importancia funcional de los proveedores de segundo nivel y del número de partes que se les han asignado para su fabricación, impactando en la calidad y en el precio de los componentes que los proveedores de primer nivel abastecen a los ensambladores de automóviles.

Como consecuencia de esta tendencia, los proveedores directos ahora compran una mayor porción de las partes que ellos fabrican para sus clientes (ensambladores de

automóviles). Sin embargo, para Follis y Enrietti (2001), el verdadero problema que surge a partir de esta tendencia es la falta de calidad de las partes entregadas por los proveedores de segundo nivel, debido a que muchos de estos insumos son cruciales para el funcionamiento de los componentes que suministran, y que afectan la imagen del producto final y la satisfacción de los clientes. Señalan que la experiencia reportada en la *Fiat auto, Suppliers Convention* de 1994, el 75% de los defectos que suponen alguna reparación o sustitución de un componente, habían sido en autopartes fabricadas por los proveedores de segundo nivel.

Con relación al precio, la creciente tendencia de formular contratos entre ensambladores de automóviles y los proveedores directos conforme al ciclo de vida del modelo del vehículo, con cláusulas de reducción anual de precio en ciertos componentes, genera algunas presiones en la cadena de suministro, debido a que los proveedores de primer nivel, establecen similares condiciones a los proveedores de segundo nivel, y así sucesivamente (Harrison, 2002).

Para lograr lo anterior, los proveedores de primer nivel comparten los requisitos que les imponen los ensambladores con sus proveedores a quienes solicitan una creciente participación en el desarrollo, diseño, e ingeniería de los componentes que producen; por ejemplo, Santarini (2006) señala que los ensambladores solicitan a los proveedores de primer nivel desarrollen prototipos de los componentes encargados, los cuales son diseñados conjuntamente con los proveedores de segundo nivel. Hasta hace muy poco tiempo estas actividades no eran tan relevantes para los proveedores de segundo nivel, como lo había sido para los de primer nivel, que además requiere de buenas prácticas de *know-how* de procesos de fabricación. Ahora esto no es suficiente. En este contexto, los proveedores directos están obligados a reproducir los mismos procesos, y asignar a sus proveedores responsabilidades similares. Por este motivo, las empresas en el segundo nivel están llamadas a desarrollar nuevas actividades, que requieren sofisticadas competencias aumentando la complejidad de los productos que abastecen como lo sugiere la *Society of Motor Manufacturers and Traders* (SMMT, 2002).

De acuerdo con un estimado de los grandes ensambladores de automóviles, en promedio, los proveedores europeos de primer nivel tratan con 100 sub-proveedores

(proveedores de segundo nivel)⁴. Follis y Enrietti (2001) señalan que esta gran disponibilidad de empresas, entre las cuales los proveedores directos pueden seleccionar, les permite sostener la presión que los ensambladores de automóviles ponen sobre ellos, relacionados con el precio y las entregas *justo a tiempo*. Sin embargo, por las actuales tendencias ya mencionadas, esta ventaja se ha convertido en un requisito insoslayable por la necesidad de que el propio proveedor asegure la más alta calidad en sus insumos, siendo al mismo tiempo, capaz de jugar con un aumento de su autonomía en el diseño e ingeniería del producto. Dada estas restricciones, la compra fragmentada supone también altos costes de transacción.

En cualquier caso, las diversas empresas que ahora operan en el segundo nivel de la cadena de suministro, deben ser capaces de cumplir con esos nuevos requisitos. Teniendo en cuenta la estructura de este segmento de la cadena de suministro del sector de la automoción, Follis y Enrietti (2001) distinguen tres grupos de empresas:

- a). Aquellas que son capaces de adecuar su funcionamiento para lograr la reducción de costes, estándares de calidad y capacidad de diseño, o tener en cualquier caso, recursos para emprender las acciones de innovación necesarias para lograr esos resultados. En promedio, este grupo de empresas está conformado por 100 empleados, los cuales son especialistas de esta industria. Este grupo incluye compañías del mismo proveedor de primer nivel los cuales abastecen algunos sub-componentes críticos, y muchos proveedores de primer nivel que continúan abasteciendo los mismos productos a proveedores directos, a los cuales los ensambladores han encargado componentes más complejos.
- b). Empresas, usualmente de pequeñas dimensiones, que no cumplen con los estándares en uno o más aspectos solicitados a los proveedores de segundo nivel, sin embargo, cuentan con los prerrequisitos necesarios para mejorar.
- c). Empresas de tamaño aún más pequeño, las cuales, además de poseer un desempeño insuficiente, les falta uno o más prerrequisitos para mejorar.

Estos autores estiman que el peso relativo de estos tres grupos variará según las características estructurales de cada país y del sistema industrial. Sin embargo, afirman que casi en todos los lugares muy pocos proveedores de segundo nivel pertenecen al

⁴ Fiat auto, Suppliers Convention de 1994.

primer grupo. El proceso para que dichas empresas asciendan a mejores niveles de servicio, tiene las siguientes implicaciones:

En primer lugar no todos los sub-proveedores pueden estar interesados en proporcionar el coste requerido para continuar en el sector de la automoción. Dos razones principales existen al respecto: *a)* el grado de especialización de la empresa en la industria y *b)* la fortaleza de sus relaciones con los proveedores de primer nivel. Consecuentemente:

- La mayoría de los sub-proveedores se moverá en productos que requieren niveles de calidad y de servicio inferiores; por lo tanto, se pronunciarán por realizar el menor esfuerzo en proporcionar el coste suficiente para permanecer en el sector.
- Las empresas buscarán una relación comercial estable con el proveedor de primer nivel, con el propósito de reducir la incertidumbre sobre futuras demandas; la mayoría, mantendrá su incentivo al mismo nivel para emprender acciones para cumplir las mejoras requeridas.

En segundo lugar, la gran mayoría de estas empresas parecen incapaces de tomar acciones efectivas para mejorar sus propias capacidades, debido a la falta de recursos materiales, *know how*, y frecuentemente por su inadecuada actitud cultural. Por ejemplo, es común que entre los sub-proveedores acepten una parte defectuosa cada 100 entregas – lo cual suma 10,000 partes por cada millón - como un estándar de calidad justo; por su parte, los proveedores de primer nivel están muy cerca de cumplir con un máximo de 30 a 25 unidades defectuosas por millón (Follis y Enrietti, 2001)).

4.3.4 Redefinición de los proveedores y nuevos conceptos

Mortimore y Barron (2005) afirman que las nuevas políticas de compras de las ensambladoras, que implican no sólo mayor *outsourcing*, sino transferir más de sus propias actividades a los fabricantes de autopartes, está transformando la industria con tanta velocidad que algunos de los conceptos básicos están perdiendo su relevancia. Al tradicional esquema se ha agregado un proveedor de Nivel 0.5 (*Tier 0.5*) para acomodar las emergentes integradoras de sistemas (Bouvard, *et al*, 2002). De hecho, emerge una nueva estratificación de proveedores que consiste de: *a)* proveedores integrados,

b) proveedores de sistemas, c) proveedores de componentes y d) proveedores de productos estandarizados.

a) *Proveedores integrados*. Ofrecen a las ensambladoras un amplio espectro de servicios. Productos típicos incluyen los paneles de instrumentos integrados. El éxito depende de su experiencia y su capacidad de integración física y funcional, su alto grado de eficiencia en principales componentes, su manejo firme de cadena de proveedores, su amplio conocimiento de consumidores y su sólido entendimiento del vehículo como unidad.

b) *Proveedores de sistemas*. Ofrecen experiencia en planeación y diseño de sistemas totales (conformado por múltiples componentes), para darles una funcionalidad conjunta mayor. Productos típicos que incluyen sistemas de frenos. El éxito depende de su habilidad para desarrollar la integración funcional de los sistemas totales, para profundizar en la competencia de sistemas de componentes más importantes, su entendimiento de usos y requerimientos finales del consumidor, su buen manejo de proveedores propios y cierto entendimiento del vehículo como unidad.

c) *Proveedores de componentes*. Proveedor de funciones críticas y componentes intensivos en *know-how* con fuerte capacidad de ingeniería. Productos típicos que incluyen: motores auxiliares, cigüeñales y compresores. El éxito depende de su eficiencia operacional, economías de escala, bajo coste de insumos, habilidades en *design-to-cost*, adecuada administración de la complejidad operacional, innovaciones tecnológicas y su identificación de valor para consumidores.

d) *Proveedores de productos estandarizados*. Empresa tradicional. Productos típicos que incluyen: partes estandarizadas, accesorios metálicos y de conexión. La madurez de productos da poca oportunidad para la diferenciación. El éxito depende de la eficiencia operacional, sus economías de escala y su bajo coste de factores (OESA / McKinsey & Co, 1999).

4.3.5 El control de la cadena a través de los contratos

Los criterios de precio y calidad de los productos son factores importantes que las empresas ensambladoras tienen en consideración para elegir a sus proveedores de primer nivel. Sin embargo, actualmente las empresas más avanzadas establecen que un

proveedor también debe contar con procesos y productos de alta calidad y tecnología, crear un enfoque total hacia los clientes en términos de servicio, localizar las plantas cerca de sus instalaciones, y convertirse en una empresa innovadora y creativa ampliando las actividades de investigación y desarrollo.

A partir de estas condiciones, en el sector de la automoción las relaciones fabricante-proveedor, se han tornado mucho más complejas que en otros sectores. Martínez y Pérez (2004) señalan que este tipo de relaciones han experimentado un cambio importante desde mediados de los años ochenta, como consecuencia de la reestructuración de este sector y de la difusión global de un conjunto de prácticas de gestión. Reportan que antiguamente predominaban las renovaciones anuales de contratos, un número elevado de proveedores por componente y una competencia entre proveedores basada casi exclusivamente en el precio, actualmente los estándares de esta industria evidencian que los contratos se extienden como mínimo durante la vida de un modelo, que se ha reducido el número de proveedores por componente y que la competencia se basa fundamentalmente en calidad, coste, ingeniería y plazo de entrega.

Una vez asignada la producción a una empresa autopartista, la relación comercial involucra solo órdenes de compra, y no contratos formales entre cliente y proveedores. Sin embargo, se verifica un esquema de riesgo compartido, que involucra la transferencia de tecnología por parte de los ensambladores, así como el desarrollo conjunto de matricería y maquinaria (Maceira, 2003).

Los proveedores consideran que los ensambladores les exigen aceptar una proporción cada vez mayor de los riesgos a cambio de menos beneficios. Hacen referencia al hecho de que dichas compañías a menudo les piden que cuenten con instalaciones *in situ* para los productos; insisten en vincular el pago a entregas diarias, o incluso en cuestión de horas, de pequeños lotes de productos, a raíz de lo cual, los proveedores no sólo tienen que mantener existencias o experimentar un exceso de capacidad, cuando los volúmenes de ensamblaje de vehículos son inferiores a las previsiones (lo que ocurre con frecuencia), sino que también se les exigen reducciones de precio año tras año (OIT, 2005).

Ante este escenario, puede deducirse que aparentemente los ensambladores de automóviles han encontrado la forma de lograr sus objetivos controlando la cadena de

suministro entera, o por lo menos aquellos eslabones que más conviene. Las exigencias cada vez más fuertes (en cierta forma porque así lo demanda el tipo de producto) que han impuesto a sus proveedores, lleva al desarrollo de relaciones con un alto contenido de agresividad en la forma de negociar los contratos, pero a su vez, parecen involucrar un alto grado de cooperación y coordinación, logrando con ello un nuevo modelo de gestión. En este sector, Martínez y Pérez (2004) sostienen que las relaciones que los ensambladores de automóviles tienen con sus proveedores influyen en el precio y la calidad de sus componentes. No obstante lo anterior, este último punto es de vital relevancia debido a que la calidad de un vehículo es un factor incuestionable en su fabricación, porque de ella depende, además, de la seguridad de los usuarios.

4.4 Gestión del suministro en el sector de la automoción

La gestión de la cadena de suministro del sector de la automoción es relevante porque se encuentra situada en el contexto de las industrias globales y posee una estructura que, sin importar su complejidad, parece encontrarse fuertemente integrada, sobre todo en los niveles más cercanos a la empresa central. Además, la dinámica mundial que han desarrollado cada uno de los eslabones en años recientes, y en particular las empresas ensambladoras, se han transformado las nuevas reglas de operación y co-dependencia en materia de abasto. En este sentido, dichas reglas han provocado ciertos efectos en la esfera de las relaciones comerciales y espaciales, que han consolidado diferentes esquemas de gestión para el abastecimiento de las autopartes entre las empresas. Tres de los efectos más evidentes entorno a este tema se analizan a continuación.

4.4.1 Relaciones espaciales del abasto de componentes y autopartes

Atendiendo a esta característica, la mayoría de los ensambladores de automóviles de todo el mundo han adoptado variantes del sistema de producción de la empresa japonesa Toyota; buscan que sus proveedores estén lo más próximo respecto a sus plantas de ensamblaje para tratar de evitar el abasto transnacional de componentes (adquisición a distancia) siempre que los costes (netos de aranceles de importación) y los niveles de existencias puedan afectar de manera negativa los márgenes (OIT, 2005). Como consecuencia de esta política de organización, las cadenas de suministro están siendo reestructuradas.

Bajo este contexto, Gereffi (2001) asevera que el capital industrial y el comercial han promovido la globalización al establecer dos tipos diferentes de redes económicas internacionales, a las que ha denominado *cadena productivas dirigidas al productor* y *cadena productivas dirigidas el comprador*. Define que una cadena productiva se refiere al amplio rango de actividades involucradas en el diseño, producción y comercialización de un producto. Particularmente, las cadenas productivas dirigidas al productor son aquellas en las que grandes fabricantes, comúnmente transnacionales, juegan los papeles centrales en la coordinación de las redes de producción y de abasto (incluyendo vínculos hacia atrás y hacia delante). Este autor, afirma que es una característica de las industrias de capital e industrias con tecnología intensiva, tales como el sector de la automoción, aviones, ordenadores, semiconductores y maquinaria pesada.⁵

Por lo anterior, puede decirse con claridad que en el sector de la automoción, los ensambladores son los agentes económicos clave no sólo en términos de sus ganancias, sino también en su capacidad para ejercer control en vínculos “*río arriba*”, con proveedores de materia prima y de componentes, y de vínculos “*río abajo*” en la distribución y las ventas. Por tanto, teniendo en cuenta la definición de Gereffi (2001), puede aceptarse que la cadena de suministro del sector de la automoción y de las autopartes es una cadena orientada al proveedor, con sistemas de producción multivariantes que involucran a miles de empresas.

Esta característica puede ser corroborada por el simple hecho de que los ensambladores de automóviles actualmente han optado por una política de reducción de proveedores de primer nivel, instrumentando el suministro de módulos completos en lugar de autopartes, dejando esta gestión a sus proveedores directos (Humphrey y Memedovic, 2003).

Además, exigen a los proveedores de primer nivel que adopten una estrategia *justo a tiempo* para que el control de los inventarios sea más eficaz y el abasto de productos al proceso de ensamblaje sea en horas, más que en días o semanas; es

⁵ *Las cadena productivas destinadas al comprador se refieren a aquellas industrias en las que grandes detallistas, los comerciantes y los fabricantes de marca, juegan papeles de pivotes en el establecimiento de redes de producción descentralizada en una variedad de países exportadores, comúnmente localizados en países de economía emergente. Sectores relevantes: vestuarios, zapatos, juguetes, artículos para el hogar.*

importante destacar que muchos componentes en este nivel son de alto coste, mayor valor añadido, de mayor volumen y frágiles para ser transportados a grandes distancias.

Alonso y Vázquez (2006) señalan que acercar los proveedores a la planta es una buena forma, por tanto, de reducir los costes de coordinación y minimizar los inventarios hasta el límite de crear un recinto para los mismos, como es el caso de Ford en Almussafes en Valencia, España. Sin embargo, señalan que la tendencia será distinta en el futuro debido a las siguientes tres razones:

- a) Actualmente, existe ya un cierto oligopolio en la provisión de algunos componentes, que permite a determinados proveedores, imponer sus condiciones de localización a los grandes ensambladores.
- b) La autonomía de localización del proveedor respecto del cliente, sólo es posible gracias a que las tecnologías de información y comunicación (TIC) facilitan a las propias fábricas de ensamblaje, la coordinación de la producción [y el abasto] de componentes, independientemente de donde se sitúe.
- c) Que el incremento de la especialización resultante, aumenta suficientemente la productividad para compensar los posibles costes logísticos extra, y la falta de coordinación debido al alejamiento.

Sin embargo, Humphrey y Memedovic (2003), por otro lado, incluyen también que las limitaciones de financiamiento y de gestión de recursos de muchos proveedores de segundo nivel, reducen las posibilidades de que los proveedores directos sigan a los ensambladores en países en vías de desarrollo.

Por lo anterior, la OIT (2005) reconoce que es casi imposible que no exista el comercio transfronterizo de componentes, y además de que éste pueda ser de magnitudes considerables cuando las condiciones son más favorables que el aprovisionamiento local. Esta organización establece cuales son las condiciones favorables que pueden coincidir, por ejemplo, cuando:

- a) Se establecen nuevas plantas de ensamblaje en mercados en los que los proveedores locales existentes no tienen capacidad para aprovisionarlas al precio y con los niveles de calidad requeridos.

- b) Un proveedor puede enviar componentes al exterior en términos competitivos gracias a economías de escala o a los costes laborales que rigen en una determinada fábrica, o posee conocimientos técnicos especializados o derechos de propiedad intelectual protegidos respecto de tecnología a los que no puede acceder un fabricante recurriendo a otros proveedores.
- c) El gobierno de un país donde se encuentra una planta de ensamblaje permite la importación de componentes con aranceles que no perjudicarán las inversiones en ese país de los fabricantes extranjeros (los gobiernos por lo general alientan las inversiones en el país por parte de los proveedores de componentes de nivel 1 próximos a las plantas de ensamblaje, considerando a estas últimas como inversor primario e “imán” para atraer proveedores y lograr el objetivo del porcentaje de contenido local por vehículo).
- d) Se exportan piezas como repuestos y no con fines de montaje.
- e) Un proveedor opera con una estructura “radial” a través de la cual realiza operaciones comerciales transfronterizas con sus propios proveedores y filiales.

El comercio transfronterizo de componentes entre proveedores (como exportadores) y ensambladores de automóviles (como importadores) sigue siendo necesario, tal como se indica en el inciso a), por lo menos hasta que los proveedores puedan “afianzarse” en nuevos mercados de clientes fabricantes. En general, la estructura de los programas de ayuda del gobierno para las inversiones internas, hace que puedan establecerse más rápidamente nuevas plantas de ensamblaje que plantas abastecedoras.

Camino (2004) establece que desde este punto de vista, se acepta por un lado, que el territorio es el lugar de realización de los intereses individuales de las compañías, y por el otro, que su protagonismo se determina a partir de la importancia que se pueda asignar a la distancia entre las empresas como condicionante del modelo relacional que se establezcan entre los actores que participan en el proceso de abasto.

Puede ser necesaria hasta una década (abarcando dos generaciones de modelos de vehículos) para que una planta de ensamblaje “totalmente nueva” pueda lograr una proporción del 80% de contenido adquirido localmente. Durante ese tiempo, será

necesario contar con apoyo logístico y de infraestructura para lograr la eficiencia en las importaciones de componentes, tanto de fábricas de proveedores como de fábricas de componentes integrados tales como las fábricas de motores (OIT, 2005). Sin embargo, un efecto que no puede pasar por alto, es el hecho de que los proveedores están enfrentando cargas intolerables de sobrecoste. El Instituto Suizo del Automóvil (*Price Watherhouse Coopers; PwC*: por sus siglas en inglés), señala en un informe reciente, que el mercado en donde compiten los ensambladores sufre de exceso de capacidad que contribuye a un ambiente inflacionario (PricewaterhouseCoopers, 2005).

Afirman que el índice de precios al consumidor europeo EU HICP (*Harmonised Indices of Consumer Prices*), por ejemplo, ha aumentado en 17% desde 1995, mientras que el índice de precios de los automóviles nuevos ha aumentado sólo el 5%; de esta manera, la presión que ejercen los ensambladores por reducir los precios, empuja a los base de proveedores ha buscar soluciones más rentables. Según dicho informe, es común que esas compañías establezcan metas anuales para reducir el coste en alrededor del 5% y el 10%.

Adicionalmente a las presiones de arriba hacia abajo, los proveedores de segundo nivel también están enfrentando la presión creciente del alza de los costes, por ejemplo, de las materias primas, de la implicación en el desarrollo del producto, por la necesidad de ofrecer mayor garantía a partir de una mejor calidad, entre otras (Follis y Enrietti, 2001). Dado este ambiente competitivo y de presión, estos autores afirman que no resulta extraño que los proveedores se estén localizando en los países emergentes.

En este marco de relaciones cooperativas y ajustadas, adicionalmente, la localización de los centros de producción aparece como un factor crucial. A los criterios tradicionales de localización como los costes salariales, capital humano, incentivos públicos, fiscalidad o suelo industrial, se añaden ahora los criterios logísticos.

Alonso y Vázquez (2006) afirman que no es la cercanía entre proveedor y ensamblador el único elemento que abarate normalmente el coste del transporte; es, sobre todo, que esta proximidad favorece la implantación de las prácticas operativas de aprovisionamiento ajustado. Así, un sistema definido por entregas frecuentes, tamaños de lote reducidos y niveles de inventarios mínimos, provoca que el coste de la logística sea superior en localizaciones lejanas al ensamblador.

El cambio experimentado de los últimos años en el sector de la automoción, más que demostrar el declive de las zonas industriales, parecen conducir al redescubrimiento de la importancia de la ubicación geográfica de la producción y de las redes de interdependencia pactada y no pactada entre las empresas y los agentes sociales en los que se lleva a cabo la producción (Jiménez, 2004). Por ejemplo, Humphrey y Memedovic (2003), señalan que México ha demostrado ser una localización atractiva para ensamblar vehículos y producir componentes de mano de obra intensiva. No obstante, aclaran que existe una preferencia creciente de utilizar los mismos proveedores localizados en diferentes sitios, limitando las posibilidades para abastecerse de fabricante locales.

Camino (2004) afirma que en una situación de superioridad competitiva, ciertas empresas podrían considerar al ámbito relacional como un espacio tecnológico susceptible de una gestión encaminada a la reducción de costes, a través de la variación de formas de funcionamiento del tipo JIT; para este autor, dicha consideración le permite observar que la realidad de las relaciones inter-empresariales plantea un amplio abanico de escenarios sobre la organización espacial de los aprovisionamientos.

Esto último, en cierta forma confirma que los flujos internacionales de autopartes continuarán presentándose en la medida de que los mercados no alcancen la madurez tecnológica que requieren las grandes compañías. Por supuesto, ello no significa que el sistema de producción deba considerarse por separado de las características locales y de los factores humanos que contribuyen a su realización, sino por el contrario, debe contemplarse como una unidad productiva integrada local e internacionalmente bajo la necesidad de una mayor coordinación de la cadena de suministro global.

4.4.2 Las relaciones fabricante-proveedor y su efecto en el suministro

El tópico de las relaciones entre clientes y proveedores, es un tema fundamental que forma parte de los principios que sustentan la cadena de suministro moderna. Desde hace tiempo, existe una gran cantidad estudios y autores (Hendrick y Ellram, 1993; Lambert y Gardner, 1996; Giménez, 2000; Rey, 2001; Holweg, *et al*, 2005) que han desarrollado ensayos sobresalientes de este tema: la mayoría de ellos basándose en las relaciones cliente-proveedor de la industria del automóvil.

El tópico discutido con mayor amplitud en este sector es el cambio de las relaciones de confrontación basado en el precio, a un modelo relaciones de colaboración. De hecho, Martínez y Pérez (2004) reconocen que las relaciones que los ensambladores tienen con sus proveedores influyen en el precio y la calidad de los componentes de un automóvil. De manera particular, en esta tesis se asume que una parte importante de ese precio se debe a la logística empleada para el abastecimiento de las autopartes, definida a partir del tipo de relaciones entre clientes y proveedores.

En este contexto, Frigant (1995) señala que el abasto de los productos es un ámbito relevante en las relaciones de cooperación entre proveedores y clientes que se manifiesta en el flujo de las mercancías, con objeto de conseguir una circulación coordinada y eficaz de las mismas. Camino (2004) complementa que si tal coordinación aparece como requisito indispensable para el funcionamiento de las relaciones entre empresas organizadas en una estructura reticular, crece en alcance cuando esa estructura se basa, como en el caso del automóvil, en un modelo relacional con prácticas de funcionamiento organizativo próximas a lo que la literatura califica como de *justo a tiempo* (*just-in-time*, o JIT).

Como se sabe, dicho modelo trata de explotar, en términos de eficacia, todas las posibilidades que pueda ofrecer la coordinación en la circulación de mercancías entre empresas. Por consiguiente, tiene un contenido que va más allá del que plantea la dinámica tradicional de pedidos-entregas. No se trata ya de que el proveedor fabrique un pedido para una fecha determinada, sino de que ajuste el ritmo de sus producción a las necesidades, tanto en cantidad como en calidad y variedad, que tenga el cliente en cada momento de tiempo (véase Liker, 2004). En sus formas de coordinación más intensas implica una integración de *facto* de las cadenas de producción, de tal manera que el proveedor atendería las necesidades de aprovisionamiento del cliente a través de entregas secuenciadas que pueden realizarse en la propia cadena de montaje de éste último (véase por ejemplo, Monden, 1988 y Ocaña, 1992), necesariamente en un entorno de colaboración.

En un sector industrial como el del automóvil, con el grado de desintegración vertical que posee, las restricciones de proximidad que pueden plantearse en las relaciones cliente-proveedor, van a tener una particular importancia en la explicación de

la problemática espacial para el abasto, sobre todo entre los ensambladores de automóviles y los proveedores de primer nivel.⁶

Ciertamente, la inexistencia de restricciones de proximidad no evitará el desplazamiento de alguna empresa, a cambio, incrementará la complejidad de la red del sector, ahora sin condicionantes geográficos entre las empresas. Así pues, el estudio de las restricciones de proximidad que se están planteando en el contexto de las relaciones empresariales del sector de la automoción, es una actividad inevitable. Camino (2005) lleva a cabo este tipo de análisis utilizando el enfoque analítico de flujos relacionales que propone Rallet (1995). La clasificación de dichos flujos se lleva a cabo teniendo en cuenta la tipología de los eslabones de la cadena de suministro ya establecida, es decir: *a)* fabricante o ensamblador de vehículos, *b)* proveedor de primer nivel (proveedores de sistemas) y *c)* proveedor de segundo nivel (proveedores de componentes).

A partir de esta tipología, define que los flujos relacionales más significativos son los siguientes:

Relación A: Proveedores de segundo nivel (componentes)-Proveedores de primer nivel (conjuntos/módulos).

Relación B: Proveedores de primer nivel (conjuntos/módulos)-Ensambladores de automóviles.

De acuerdo con el desarrollo teórico que plantea, describe los contenidos de estas relaciones a partir de los flujos que tienen lugar entre los agentes en dos ámbitos distintos, circulación de mercancías y flujos de información, que se identifican como condicionantes de los requerimientos espaciales (Aláez, *et al*, 1996):

1. Exigencias logísticas derivadas de los flujos materiales
2. Características de los flujos inmateriales

En este sentido, sin embargo, plantea que se debe tener en cuenta que el desarrollo de sistemas de comunicación, el intercambio electrónico de datos (EDI), las conexiones

⁶ *El concepto de restricciones de proximidad hace referencia a la existencia de circunstancias que hacen que dos agentes que se relacionan tengan que hacerlo localizándose geográficamente próximos, para evitar que esas relaciones pierdan valor competitivo. La estructura reticular de la industria del automóvil y las fuertes exigencias logísticas a que están sometidas las empresas hacen especialmente significativa esta cualidad (Camino, 2005).*

de tipo intranet, así como sistemas de almacenaje o logística integral, permiten relajar los requerimientos de proximidad geográfica y sustituir este concepto por la noción de proximidad relacional.

Relación A: Proveedores de segundo nivel (componentes)-Proveedores de primer nivel 1.

1. Exigencias logísticas: los suministros no han experimentado cambios muy drásticos en términos de frecuencias de las entregas y de antelación con que se fija el volumen y composición de los pedidos. Han experimentado un cierto endurecimiento de las condiciones, pero el desarrollo de sistemas de comunicación, EDI y sistemas de almacenaje ha permitido relajar el requerimiento de proximidad geográfica y sustituirlo por la noción de proximidad relacional.

2. Características de los flujos: *a)* diseño cerrado; *b)* lenguaje perfectamente codificable; y, *c)* innovación de medio plazo (modificaciones de modelo).

En este caso, los sistemas de comunicación disponibles permiten obviar la restricción de proximidad.

Relación B: Proveedores de primer nivel (sistemas) – Ensambladores de automóviles

1. Exigencias logísticas: los términos del suministro han variado radicalmente con la generalización de los sistemas de entregas *justo a tiempo*, que supuesto un notable incremento en la frecuencia de las entregas (normalmente diaria, o incluso varias entregas por día) para conseguir la reducción al mínimo de los inventarios del fabricante y también una escasa antelación determinación del volumen y composición de los pedidos (frecuentemente, 24 ó 48 horas). Estas mayores exigencias no plantean necesariamente requerimientos de proximidad geográfica entre las empresas que se relacionan, debido al desarrollo de sistemas de comunicación, EDI, conexiones intranet, así como de sistemas de almacenaje o logística integral.

2. Características cognoscitivas de los flujos: el análisis genérico de los contenidos cognitivos de los flujos que se producen entre estos agentes permite establecer las siguientes características: *a)* existe espacio creativo común (posibilidades de cooperación); *b)* lenguaje perfectamente codificable; *c)* interacciones muy intensas

en determinadas etapas de la concepción; d) cadencia innovadora de medio plazo (modificaciones de modelo).

4.4.3 El aprovisionamiento ajustado y el programado

El aprovisionamiento ajustado (o filosofía *justo a tiempo*), también conocida como producción ajustada (Womack, *et al*, 1990), es un “enfoque en la dirección de operaciones [que] pretende que los clientes sean servidos justo en el momento preciso, exactamente en la cantidad requerida, con productos de máxima calidad y mediante un proceso de producción que utilice el mínimo inventario posible y que se encuentre libre de cualquier tipo de despilfarro o coste innecesario” (Domínguez, *et al*, 1995). Shingo (1981) identifica siete fuentes principales de despilfarro: sobreproducción, tiempo de espera entre procesos, excesivo transporte entre etapas del proceso, procesos que no añaden valor, inventarios, movimientos innecesarios y productos defectuosos. Todas ellas deben ser eliminadas (González, 2001).

Esta nueva filosofía productiva implica cambios importantes en la forma de llevar a cabo las relaciones con los proveedores, proponiendo nuevas prácticas englobadas bajo el término “aprovisionamiento ajustado” (Lamming, 1993). Este autor, señala que el modelo de aprovisionamiento ajustado en el sector de la automoción puede caracterizarse bajo nueve factores principales, surgidos de las relaciones comerciales entre ensambladores y proveedores:

1. *Naturaleza de la competencia.* La competencia será global y parte de ésta, será la disponibilidad del proveedor para ubicarse en ella donde sea requerido por el ensamblador. El proveedor aportará tecnología en el diseño del sistema en el que participe. La necesidad de abastecer servicios completos hará que los proveedores se vean obligados a crecer vía las fusiones o adquisiciones, además de participar con otros proveedores.

2. *Base para la toma de decisiones de aprovisionamiento.* En el momento de tomar decisiones respecto a los proveedores, éstas se apoyan fundamentalmente en: la capacidad para implicarse en el desarrollo de nuevos productos y el esfuerzo de mejora continúa de costes y calidad. El aprovisionamiento pasará a ser uni-fuente o bi-fuente, abandonando el sistema de múltiples fuentes de aprovisionamiento.

3. *Intercambio de información.* Es importante la transparencia real y la comunicación bi-direccional. Para ello, es necesaria la mutua confianza en la privacidad de los datos. No sólo se debe producir intercambio de datos técnicos, sino también comerciales que ayuden al proveedor a planificar mejor su trabajo.

4. *La gestión de la capacidad.* La gestión de la capacidad en el nivel operativo, táctico como estratégico, debe ser un resultado del intercambio de información transparente a todos los niveles. Se pide además, el diseño de empresas con suficiente flexibilidad para hacer frente a cambios en la demanda.

5. *Prácticas de entrega.* Estas prácticas se convertirán gradualmente en verdaderos sistemas *justo a tiempo*. En algunos casos la entrega se hará no sólo en pequeños lotes, sino además en secuencia e incluso sincronizada siguiendo el esquema de Monden (1994) denominado *Just-on-Time*. Este punto es importante a medida que los proveedores suministran subsistemas más grandes y complejos. Los proveedores se dividen de este modo en tres grandes grupos (Lamming, 1993): *a)* los que están muy cerca del fabricante; *b)* los que están a media distancia que pueden instrumentar un esquema *justo a tiempo*, y *c)* los situados a muy larga distancia. Los proveedores pertenecientes a los dos últimos grupos, podrían optar por centro de consolidación, para acercar el proveedor al ensamblador.

6. *Negociación de cambio de precio.* La reducción continua de precios se basa en el esfuerzo conjunto de ambas partes. Es una combinación de presión para reducir los costes e incrementar la cooperación y transparencia en la información. Esta tarea se realiza de manera coordinada y a mediano plazo.

7. *Actitud hacia la calidad.* Se elimina la redundancia en las operaciones de inspección, excepto para los nuevos proveedores. Existe, además, un acuerdo mutuo sobre los objetivos y una interacción constante para alcanzarlos.

8. *La investigación y el desarrollo.* Estas dos actividades conjuntamente forman parte básica del modelo de Aprovisionamiento Ajustado. La responsabilidad en la I+D del proveedor es suficientemente amplia como para alcanzar a los proveedores de éste. Además, el ensamblador confía estas tareas en un número cada vez menor de proveedores.

9. *Nivel de presión en la relación.* Se desprende de los factores anteriores, que el nivel de presión es muy elevado como base para la mejora continua. Además, la presión debe ser auto impuesta, más que dictada desde el exterior.

Mehra e Inman (1992) establecen que el sistema *justo a tiempo*, entre otras cosas, “...es una estrategia de aprovisionamiento que obtiene niveles más altos de productividad y calidad a base de reducir el tamaño de las entregas y el tiempo de espera y de utilizar un único proveedor y exigir certificaciones de su calidad”. Así pues, la producción ajustada propone una forma particular de gestionar la función de compras y el aprovisionamiento conocida como “aprovisionamiento ajustado” (Lamming, 1993). El aprovisionamiento ajustado esencialmente involucra la reducción de inventarios dentro de las instalaciones del ensamblador con la finalidad lograr el nivel más bajo posible (González, 2000). Con este modelo las compañías ensambladoras mantienen los menores costes por manutención de inventarios pero deben recibir sus productos o insumos justo a tiempo para ser utilizados.

Para Belzer (2000), idealmente la fabricación ajustada es como “*vivir sin carga*”, ya que se trata de enviar los componentes directamente a la línea de producción. Para este autor, el concepto representa un proceso de fabricación ajustada, basada en entregas *justo a tiempo*, involucrando precisamente la coordinación en la cadena de suministro. De acuerdo con Belzer (2000), la operación del transporte (usualmente camiones) entrega una carga de componentes que son descargados del camión directamente a la línea de ensamble, *justo a tiempo* para su instalación. En algunos ambientes de “*vivir sin carga*” del tipo *justo a tiempo* (por ejemplo, asientos para automóviles), las partes abastecidas son secuenciadas en el orden que se van necesitando en la línea. Los asientos salen del camión en el momento que van a ser utilizados por la planta ensambladora. El proceso ahorra costes de inventario, costes de almacenaje y evita la doble manipulación.

González (2001) reconoce que con este sistema es factible mejorar la capacidad de respuesta a los cambios de demanda, reduciendo al mismo tiempo los inventarios entre procesos, ya que una estación en la cadena de producción procesará un lote sólo si este es reclamado por la estación posterior. Sin embargo, enfatiza que bajo este sistema, la calidad y fiabilidad se convierten en características esenciales de cada proceso de fabricación. Si una estación falla en proporcionar el lote requerido a tiempo, o falla en

las especificaciones, la cadena tendrá que ser detenida y grandes costes serían generados.

Ferguson (2002) reporta varios casos en los que este sistema ha presentado conflictos. Por ejemplo, Toyota paró su producción debido a que no pudo recibir su materia prima por las malas condiciones del tiempo (Murphy, 1999). Por este motivo, dicha empresa contrató los servicios de una compañía que pronostica el estado del tiempo para evitar más interrupciones. Murphy (1999) puntualiza que otras compañías que utilizan el sistemas *justo a tiempo*, también han usado otras tecnologías para ayudarse a prevenir interrupciones en su abasto, tales como los sistemas de posicionamiento global (GPS, pos su siglas en inglés). En otra ocasión, Toyota cerró su planta en 1997 debido a que la fabrica de su único proveedor de frenos se incendió (Aisin Siki, Co.), estimándose una pérdida de aproximadamente \$195 millones de dólares y 70 mil unidades de producción (Treece, 1997). Como resultado, Toyota decidió abastecerse de dos fuentes. General Motors Corporation tuvo perdidas por alrededor de \$600 a \$800 millones de dólares debido a fallas de dos de sus proveedores principales (Altenburg, *et al*, 1999). Otras causas de interrupción han sido la baja calidad de los materiales que no son descubiertos hasta que llegan a la línea de producción. Esto se ha debido a la falta de una mayor inspección y al uso de pequeños envíos, entregas frecuentes de materiales los cuales son movidos desde un muelle de carga de un puerto, directamente al piso de la planta. Millingan (2000) señala que el error de abastecer en fechas límite en un sistema de aprovisionamiento ajustado, provoca que la calidad y la eficiencia se conviertan en un problema para las compañías que usan este modelo. Sobre todo para las empresas de niveles inferiores.

Como puede observarse de los errores denunciados, el funcionamiento del sistema de aprovisionamiento ajustado parece que se encuentra en un riesgo permanente, el cual se potencia para el caso de componentes o autopartes fabricadas en lugares distantes a la planta de ensamblado. Esto invita a reflexionar sobre la actuación que deben tener de los eslabones más alejados de la empresa central de la cadena de suministro del sector automoción, en torno a los sistemas de suministro y a su política de inventario.

De acuerdo con la estructura identificada de la cadena de suministro de este sector, se deduce que la industria se encuentra fragmentada por sistemas modulares, componentes y autopartes, que son abastecidos por miles de empresas que van desde

talleres pequeños hasta grandes trasnacionales localizadas por todo el mundo. En este sentido, Alford, *et al.* (2000) establece que, dependiendo del tipo de componente suministrado por cada compañía, será el nivel con el que se involucren en el ensamblado de los automóviles (véase figura 4.6).

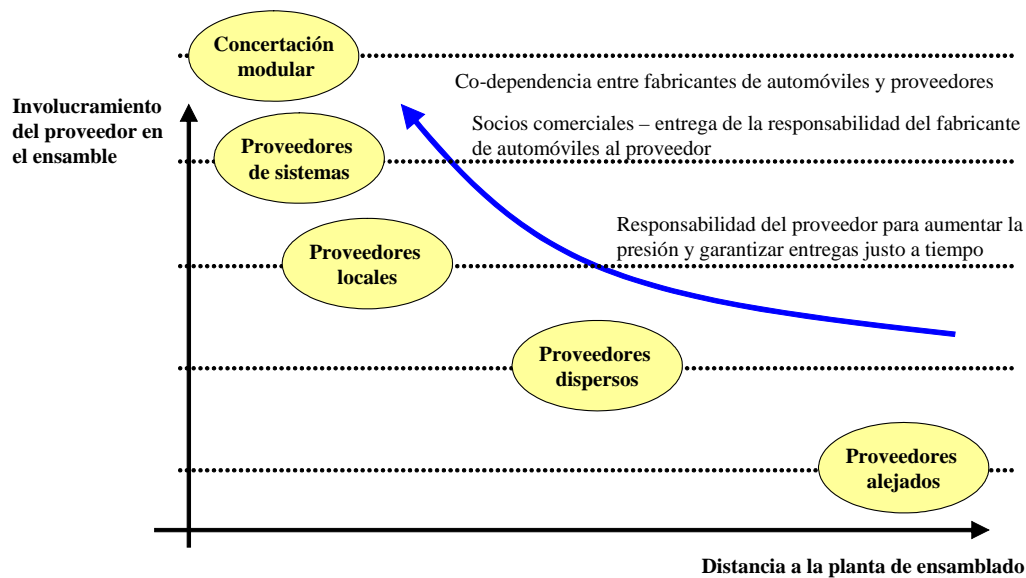


Figura 4.6
Involucramiento del proveedor en el proceso de ensamble

Fuente: Alford, *et al.* (2000).

Evidentemente, este sistema tan complejo de organización de la producción ha demandado la más alta coordinación en el suministro de componentes, que en cierta forma se ha cumplido cabalmente, por lo menos entre los proveedores de primer nivel y los ensambladores de automóviles. Los entornos de producción *justo a tiempo*, que se caracterizan por el trabajo en pequeños lotes y el control de la producción por medio de un sistema *Kanban* (sistema de “arrastre”), han sido una solución para atender la problemática relativa al sistema de inventarios en este sector.

Sin embargo, es interesante observar que dicho sistema ocasionalmente debe ser complementado con estrategias de gestión logística. Alonso y Vázquez (2006) sostienen que la localización lejana entre proveedor y fabricante no afecta a las distintas prácticas de panel, involucramiento y calidad del aprovisionamiento ajustado⁷; no obstante, señalan que sí influye en las prácticas que son denominadas operativas. Las

⁷ Las prácticas de panel hacen referencia a cuestiones como la variabilidad del panel de proveedores o la duración de la relación fabricante – proveedor; las prácticas de involucramiento, definen el papel de la participación del proveedor; y las prácticas de calidad, incluyen los criterios de calidad en cuanto a selección y evaluación de proveedores.

entregas multidiarias en sistema *Kanban* o sincrónico pueden no ser realizadas de manera directa entre proveedores lejanos y la planta de fabricación.

Fernández, *et al.* (2006) señalan que la solución para mantener estas prácticas es la utilización en proximidad de centros logísticos de recogida que garanticen este flujo frecuente. Estos centros gestionan un inventario en las proximidades de la planta de fabricación de vehículos de estos proveedores lejanos y se encargan de las entregas diarias del tipo *justo a tiempo* a dicha planta de producción. El resultado es que se amplían los lotes de entrega de los proveedores lejanos e igualmente el inventario intermedio de los componentes de dichos proveedores.

Por lo anterior, puede estimarse que el sistema *justo a tiempo* funciona adecuadamente bien principalmente para el caso del suministro de sistemas modulares y componentes relevantes que se fabrican en las proximidades de la línea de ensamblado. Pero en el caso de componentes y autopartes fabricados en lugares distantes y que forman parte de los sistemas modulares, es necesario trazar estrategias adicionales que permitan garantizar un menor coste y el suministro de los componentes. En dicho sentido las cantidades de abastecimiento de piezas y componentes y el periodo de suministro, se debe acordar bajo un enfoque de minimización de costes, pero también desde una perspectiva del nivel de servicio de manera programada.

A manera de conclusión, puede establecerse que el alejamiento del proveedor supondrá un mayor coste para cumplir los requisitos de entrega ajustada, por una parte, debido al coste extra derivado de un mayor inventario, y por otro, a un coste ligado a la gestión a través de centros de tránsito logístico próximos a la planta de ensamble de los automóviles. Por este motivo, se podría decir que para muchas de las empresas en la cadena de suministro del automóvil, el enfoque de aprovisionamiento ajustado quizá no sea un sistema adaptable, sobre todo para aquellas compañías que se encuentran alejadas del fabricante (por ejemplo, segundo nivel, tercero y sucesivas), que en algunas ocasiones tendrán oportunidad de emplear este tipo de aprovisionamiento y en otras no.

Existen casos de empresas de primer nivel que utilizan al mismo tiempo, la filosofía *justo a tiempo* y un sistema de abasto programado. Por ejemplo, *Lear Tláhuac* (en México) trabaja con el sistema *justo a tiempo* para la línea de asientos automotrices de la Ford Cuautitlán-México (en este caso, entrega los asientos en la línea

de producción de la ensambladora). En el caso de Nissan (ubicada en Japón), las relaciones comerciales son diferentes, ya que *Lear Tláhuac* mensualmente envía viseras y otro tipo de productos (García y Taboada, 2005). Por supuesto, la posición en la cadena de suministro será diferente. Para Ford Cuautitlán-México, es una empresa de primer anillo (*Tier 1*), y para la Nissan en Japón, adopta la forma de empresa de segundo nivel (*Tier 2*) que abastece en forma programada.

El suministro programado consiste en que los proveedores de localidades distantes, envían sus autopartes o componentes a un centro de recogida “plataforma de agrupación”, que es un almacén o depósito intermedio donde los subcontratistas almacenan sus materiales (Fernández, *et al*, 2006). Desde ahí, los suministros de todos los proveedores se transportan conjuntamente a la fábrica de la empresa principal, o a un proveedor de primer nivel en un esquema *justo a tiempo*, aprovechando al máximo la capacidad del transporte en todos los eslabones de la cadena. La figura 4.7 a continuación, ilustra de manera esquemática esta clase de operación.

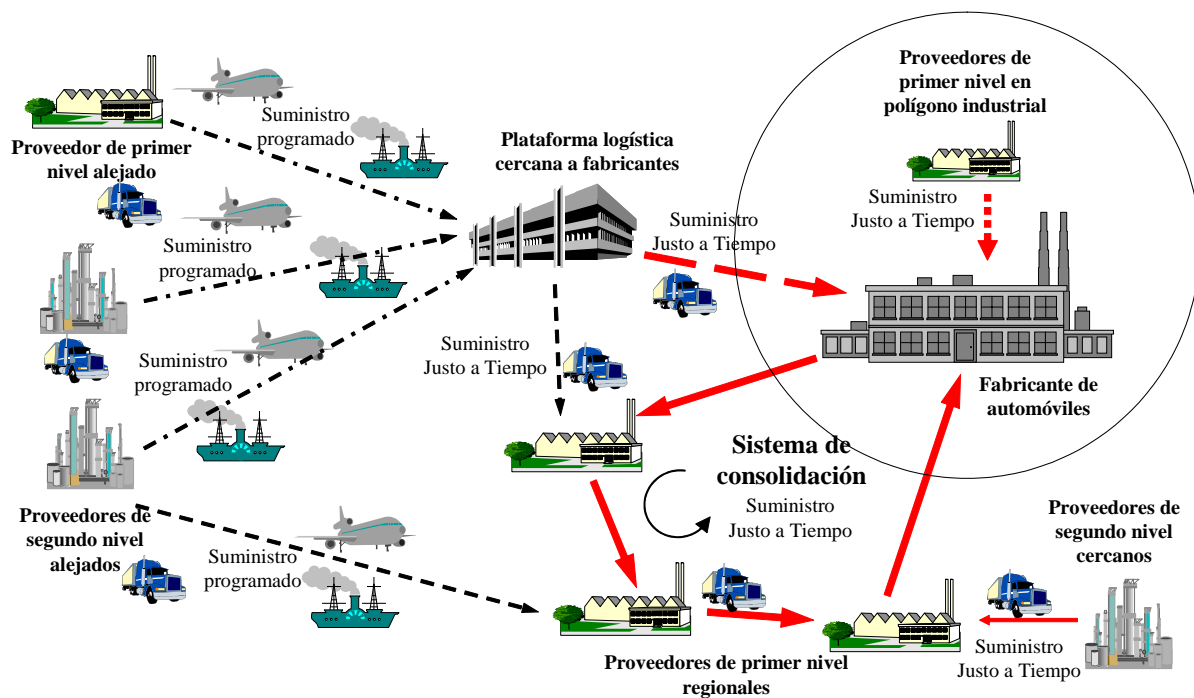


Figura 4.7
La combinación del suministro *justo a tiempo* y el programado

El suministro programado resulta eficaz en la medida que la cantidad y período de entrega de las autopartes o los componentes, sea definido de manera apropiada para que el tiempo de almacenamiento y niveles de los inventarios, no sea mayor al necesario. De lo contrario, los inconvenientes de la mantención en la fábrica del comprador se

trasladarían de inmediato a este almacén intermedio o a la fábrica del proveedor de primer nivel, si fuese el caso.

Para Alonso y Vázquez (2006), un sistema de abasto similar al suministro programado es eficiente en un ambiente donde el incremento de la distancia entre proveedores y ensambladores sólo es viable si el ahorro en el coste de producción derivado de un proveedor más barato (pero más lejano) compensa el aumento del coste logístico (mayor coste de transporte y de almacenamiento y, sobre todo, dificultades para implantar las prácticas operativas).

$$C_{PC} - C_{PL} \exists \text{ Ahorro} > C_{LL}$$

C_{PC} = Coste de producción lugar cercano

C_{PL} = Coste de producción lugar lejano

C_{LL} = Coste logístico de abastecimiento desde lugar lejano

De esta manera, la localización de los proveedores en sitios distantes se convierte en un factor crucial, desde el punto de vista del diseño logístico del suministro. Como se ha mencionado, los proveedores de los niveles inferiores generalmente abastecen productos de menor valor añadido y un esquema de aprovisionamiento ajustado puede resultar no muy eficiente.

En tal virtud, el suministro de los eslabones inferiores de la cadena de suministro resulta de interés en términos de conocer las estrategias de aprovisionamiento empleadas. Es importante tener en cuenta que en este segmento de proveedores, los productos que se abastecen son componentes individuales o autopartes que son fabricados, en su mayoría, por empresas pequeñas que presentan características tecnológicas modestas y que muchas de éstas se encuentran en sitios distintos a la de sus clientes directos (por ejemplo, proveedores de primer nivel). El conjunto de empresas de este sector de la automoción, conforman el sector autopartista.

El sector autopartista, es una división más del sector industrial de la automoción. Su importancia reside en dos contextos eslabonados: a) el impacto económico en los países donde se localiza, y b) supeditado a ese impacto, el nivel y la calidad de la gestión y administración de los flujos físicos que se derivan de la integración comercial.

Para ser más específicos, la calidad en los procedimientos logísticos en el abasto de las autopartes, puede ser un factor significativo que determina la rentabilidad de una localización, en especial para aquellas alejadas de la empresa central del sector de la automoción, que puedan ser administradas de manera conjunta con sistemas de gestión *justo a tiempo* y esquemas de abastecimiento programado.

En definitiva, independientemente del bajo nivel de interdependencia entre los eslabones inferiores de la cadena de suministro del sector de la automoción, las relaciones entre proveedores y clientes también deben estar sustentadas por sistemas avanzados que permita integrar sus procesos de gestión y de producción. Los paradigmas desarrollados por las grandes compañías del sector (GM, Ford, Toyota, etc.) no son únicos y exclusivos de estas compañías, las pequeñas y medianas empresa que abastecen las autopartes también pueden adoptar y desarrollar nuevos modelos de gestión que les sean compatibles (Jiménez, 2006).

4.5 El sector de la automoción en México

La importancia del sector automoción (incluyendo grandes ensambladoras y fabricantes de autopartes) en México es incuestionable. Dentro del contexto nacional, es la segunda en importancia después del sector petrolero. El sector automoción ha desempeñado una función relevante y decisiva en el proceso de industrialización de México, actuando como un factor con efecto multiplicador, al impulsar a otros sectores tales como la industria del vidrio, acero, hierro, hule, plástico, aluminio, textil, entre otros (BANCOMEXT, 2006). En términos generales, para Mortimore y Barron (2005), la Industria de la Automoción Mexicana (IAM) se caracteriza porque ha visto su evolución a través del tiempo en tres etapas muy específicas:

La primera etapa, que se inicio en 1962, tuvo por objetivos estimular la producción y mantener la Balanza Comercial equilibrada. Al inicio, se caracterizó por el surgimiento de una base industrial a través de políticas activas en una economía cerrada, y luego por una progresiva flexibilización de los Decretos Automotrices en el contexto de la política económica de apertura y liberalización comercial y financiera. En otras palabras, otorgó una “reserva de mercado” absoluta a la producción local de los automotores y requirió que un determinado porcentaje de valor fuese de contenido

nacional. Fue de esta manera como surgió una industria de equipos, componentes y accesorios automovilísticos grande y heterogénea.

En 1989 se inicio la segunda etapa, en la cual el marco jurídico-administrativo se hizo más flexible, permitiendo la entrada de unidades nuevas importadas, tratando de fomentar las exportaciones y la producción. Evidenció un notable éxito exportador al mercado norteamericano, sobre una fase de transición hacia políticas cada vez más pasivas en una economía abierta.

En 1994, la instrumentación del Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN, o NAFTA, por sus siglas en inglés) marcó una nueva etapa, durante la cual en forma gradual se eliminaron las regulaciones y las restricciones a las importaciones de automotores que había regido por décadas. Es durante esta etapa que se conforman las características centrales del sector automotriz mexicano actual.

Dicho de otra manera, el sector de automoción en México se ha transformando profundamente desde los años ochenta: ahora presenta una mayor integración con el exterior, especialización productiva, mayor competitividad internacional, modificó su modelo productivo (tecnológico, organizacional, laboral y espacial) y reforzó su carácter eminentemente transnacional. Estos cambios, previos al TLCAN (vigente desde 1994), han sido promovidos por los corporativos transnacionales y por la política gubernamental (Carrillo y González, 1999).

Según Contreras (2005), la Industria Nacional Automotriz (INA) ha estado sometida también a intensas transformaciones, en el marco de una compleja reorganización de la producción y del mercado en la región de América del Norte. Este autor señala que tres aspectos en este proceso han sido decisivos:

a) La regionalización de las redes de producción comandadas por las grandes firmas, en el contexto de la creciente globalización del mercado.

b) La transición tecnológica y organizativa hacia la modulación en la manufactura del automóvil, con repercusiones cruciales en la organización de las empresas ensambladoras y particularmente a sus cadenas de proveedores.

c) La subcontratación de segmentos cada vez más amplios a sus proveedores de primera línea. Para este autor, el efecto conjunto de estas tendencias al interior de la industria se refleja en una intensa reestructuración tecnológica, de la organización de las empresas y de sus relaciones con los proveedores.

El sector de la automoción mexicano está conformado por la industria terminal y la de autopartes. De acuerdo con Román (2004), ambas industrias están íntimamente relacionadas. No existiría la segunda sin la primera. De hecho, señala que la fabricación de automóviles comprende las estrategias de diseño, producción y reemplazo de autopartes, refacciones y accesorios. Es tan importante el nexo apuntado que las empresas fabricantes de autopartes consideran al menos, dos formas de producción. Las relativas a la entrega (aprovisionamiento) de autopartes a los ensambladores (clientes) para la fabricación de unidades nuevas (equipo original); y la generación de inventarios (y venta) a las mismas ensambladoras o a otra agencia económica en los circuitos de distribución (mercado de repuestos).

De acuerdo con el sistema de cuentas nacionales, las actividades del primer sector se enfocan principalmente al ensamble de vehículos (rama 56); en tanto, la segunda produce partes y componentes automotrices (rama 57), y productos de hule (llantas y cámaras) (rama 41).

Específicamente, la industria terminal representa el 52.4% del PIB del sector de la automoción, mientras que la industria de autopartes representa el 47.6% (véase figura 4.8); en particular, se estima que existe más de mil fabricantes de autopartes de los cuales 70% son empresas extranjeras y 30% nacionales (Guerrero, *et al*, 2004).

Según las cifras del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) en México, el sector de la automoción contribuyó en el 2004 con el 3.0% del PIB nacional, y 14.9% del PIB Manufacturero (INEGI, 2005). Dicho de otra manera, el valor agregado bruto de la producción de esta industria fue de \$15 mil 506 millones de dólares.

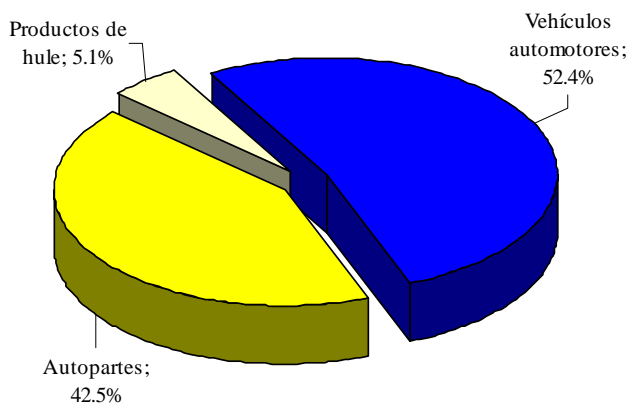


Figura 4.8
PIB del sector de la automoción, 2004

Fuente: INEGI (2005).

Por otro lado, en el sector de la automoción participa el 1.5% del personal ocupado total a nivel nacional y 13.1% en el sector de las manufacturas. Según Guerrero, *et al.* (2004), con información de INEGI y de la Secretaría de Economía, en el sector de la automoción existían 464,700 personas con empleo en el 2003. El sector de autopartes contribuye con el 88% del empleo total (408,500 trabajadores) y la industria terminal el restante 12% (56,200 trabajadores). Cabe señalar que en los últimos años se ha registrado un ligero descenso en el número de empleados de este sector debido a las dificultades que ha enfrentado la industria en su conjunto, así como mejoras en los procesos e incrementos de productividad (INA, 2006).

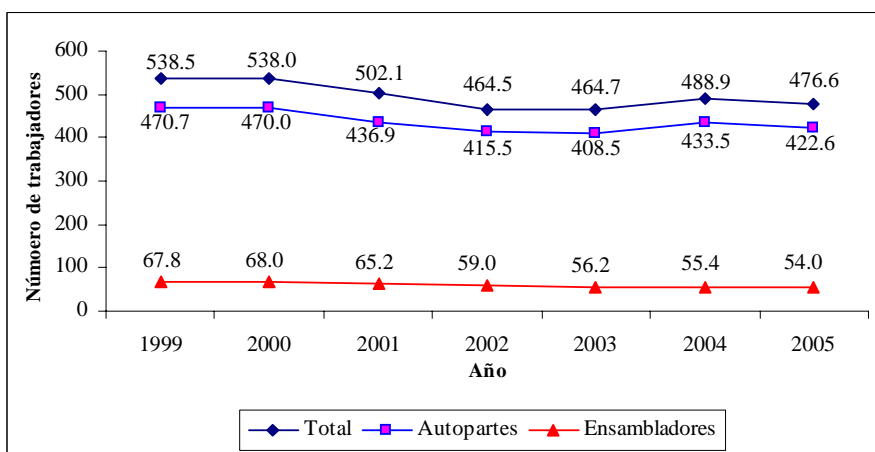


Figura 4.9
Empleo directo en el sector de la automoción
(miles de personas)

Fuente: INA (2006).

En este contexto, una primera observación sobre este último punto, es la extraordinaria importancia que tiene el sector de las autopartes en México. Pues como se observa, participa una gran cantidad de trabajadores, en comparación con la industria terminal. No obstante, como ya se dijo antes, ambas industrias son indiscutiblemente interdependientes.

4.5.1 La industria terminal

La industria terminal está integrada por 17 empresas establecidas en México que fabrican o realizan el ensamble final de autos, camiones y motores (véase cuadro 4.4). Varias de estas empresas son de capital 100% extranjero, por ejemplo: Daimler Chrysler, Ford, General Motors, Nissan, Volkswagen.

**Cuadro 4.4
Industria Terminal en México**

Automóviles	Camiones pesados y autobuses	Motores
BMW	Daimler Chrysler	Daimler Chrysler
Daimler Chrysler	DINA	GM
Ford	Ford	Ford
GM	GM	VW
Honda	Kenworth	Nissan
Nissan	Masa	Renault
Renault	Volvo	Perkins
VW	Ommibuses Integrales	Cummins
	Scania	
	Navistar	

Fuente:IECE (2004).

Por su localización, la instalación de plantas dedicadas a la fabricación de vehículos predominan dos tendencias principales: en el región centro y la frontera norte de México (figura 4.10).

En general, de manera preeliminar para el 2004 el volumen de unidades producidas por estas compañías se ha estimado en 1`568,456 vehículos automotores (30% para el mercado nacional y 70% para el internacional); de ese gran total, el 60% son automóviles (INEGI, 2005).

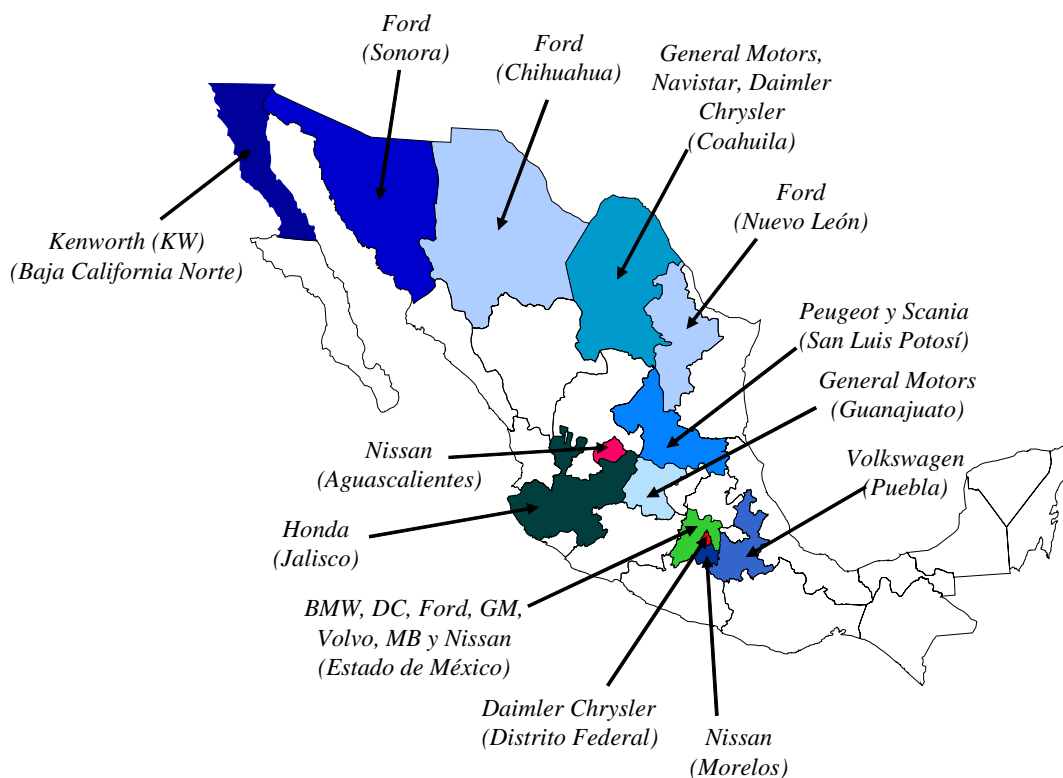


Figura 4.10
Principales ensambladoras de vehículos en México

Fuente: Román (2004).

En el sector de los automóviles, la participación en la producción por empresa está liderada por la compañía japonesa Nissan Mexicana, con aproximadamente el 45% del total producido anualmente en México, rebasando a Ford Motor Company desde el año 2000. Estas dos compañías, junto con Volkswagen de México, acumularon en el 2003 el 90% de la producción nacional de automóviles (véase figura 4.11).

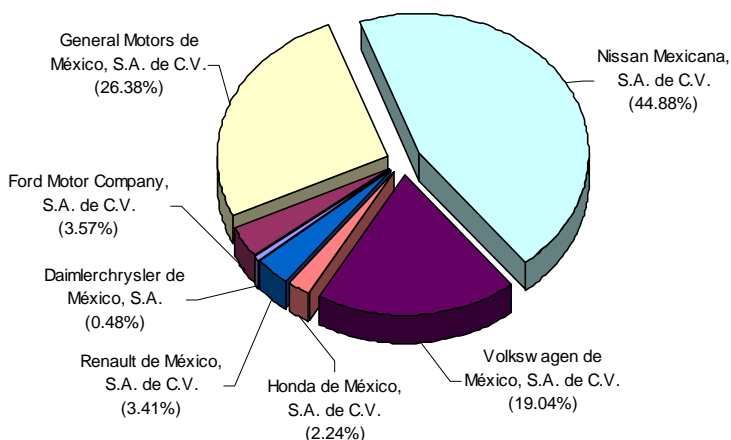


Figura 4.11
Volumen de la producción de automóviles por empresa y marca

Fuente: elaboración propia con base en INEGI (2005).

Según Brown (1999), durante el período de 1990 y 1997 el PIB manufacturero creció a una tasa promedio anual del 3.1%, mientras que la tasa que registró la industria terminal fue del 7.2%. Sin embargo, de acuerdo con los datos del INEGI (2005), durante el período de 1997 al 2003, se observa que esta tendencia se ha modificado y todo parece indicar que se encuentra en una recesión; ahora, dicha industria presenta una tasa de crecimiento promedio anual del PIB de -8.3%, muy por debajo del 2.6% que presenta el PIB manufacturero.

A pesar de estos resultados, el sector del automóvil, en general, presenta una tasa de crecimiento promedio anual de 4.3% en dicho período. Estas cifras permiten percibir que la industria terminal se encuentra en una depresión económica, en tanto que el sector autopartista parece exhibir una mayor fortaleza, tal y como se demuestra más adelante.

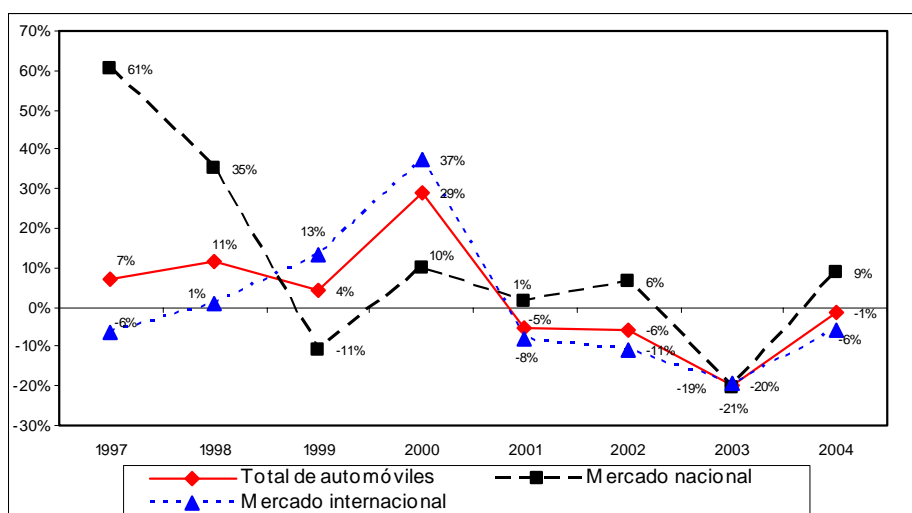


Figura 4.12
Variación porcentual de la producción de automóviles por mercado

Fuente: elaboración propia con base en datos del INEGI (2005).

No obstante lo anterior, en términos de su valor agregado, la producción de la industria terminal ha mostrado cierto repunte en sus actividades, esto ha permitido mantener un índice de volumen físico del valor agregado bruto del sector de la automoción por arriba del total de industria manufacturera (véase figura 4.13).

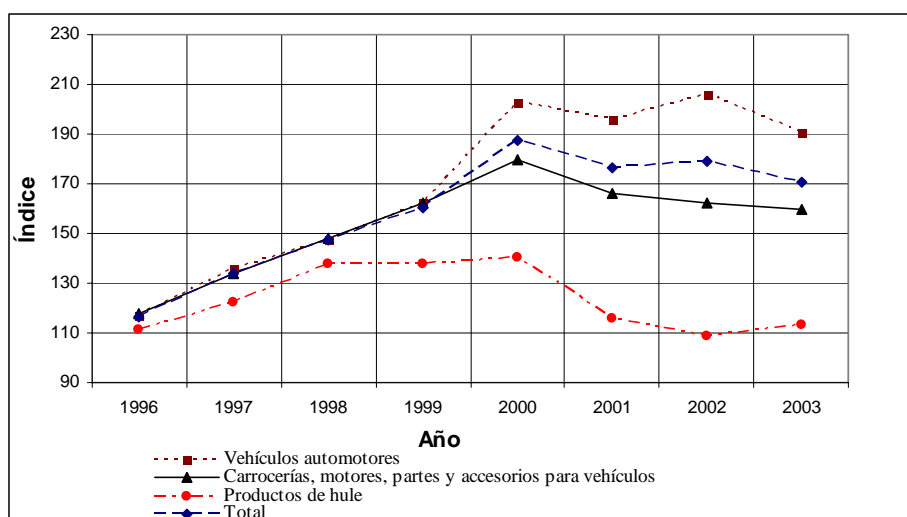


Figura 4.13
Índice del volumen físico del valor agregado bruto del sector de la automoción según rama de actividad

Fuente: INEGI (2005).

Para algunos inversionistas, este hecho es solamente uno de los diversos motivos para seguir confiando en realizar negocios en México, por lo tanto, continúan haciendo planes para ampliar sus plantas de ensamblado (BANCOMEXT, 2005).

En concordancia con Brown (1999), las cifras de la balanza comercial de esta industria muestran el dinamismo del comercio exterior. Desde el año de 1987 el sector registra un superávit comercial que se explica por el crecimiento sin precedentes de las exportaciones; en la actualidad, de acuerdo con los datos del INEGI (2005) se pudo calcular que de cada 10 coches que se producen en México, aproximadamente 7 son de exportación.

A manera de conclusión, es evidente que el dinamismo de la industria terminal ha sido menor en los últimos años debido a que las ventas de vehículos en Estados Unidos han venido disminuyendo, registrándose una tendencia hacia la baja en las exportaciones de vehículos. Dado la madurez de este mercado, y sobre todo, las bajas expectativas de competitividad ante países de Asia, hay posibilidades de que la tasa de crecimiento se mantenga cercana a cero, por lo menos, algunos años después de las elecciones de julio del 2006 en México cuando el nuevo gobierno busque reactivar este sector, en lo que se refiere a la exportación de productos automotrices mexicanos, y en particular de vehículos terminados.

4.5.2 El sector de las autopartes

La industria de autopartes en el país se compone de dos mercados: el de componentes que se usan directamente en la fabricación de automóviles nuevos (equipo original), y el de repuestos. Estimaciones de la Industria Nacional de Autopartes, A.C. (INA), señalan que el valor de la producción nacional de autopartes para el 2005, considerando la producción de las importaciones y las exportaciones fue de aproximadamente \$28,941 millones de dólares.

Actualmente, la INA estima que el sector de autopartes está constituido por mil empresas de las cuales 70% son de capital extranjero y 30% nacional. Del universo total de empresas, 345 de ellas son fabricantes de primer nivel y las restantes corresponden a fabricantes de insumos y materias primas de segundo y tercer nivel. Este tipo de empresas, sigue un patrón un poco diferente a las ensambladoras en México, ya que sus preferencias de localización están en la región centro y occidente del país.

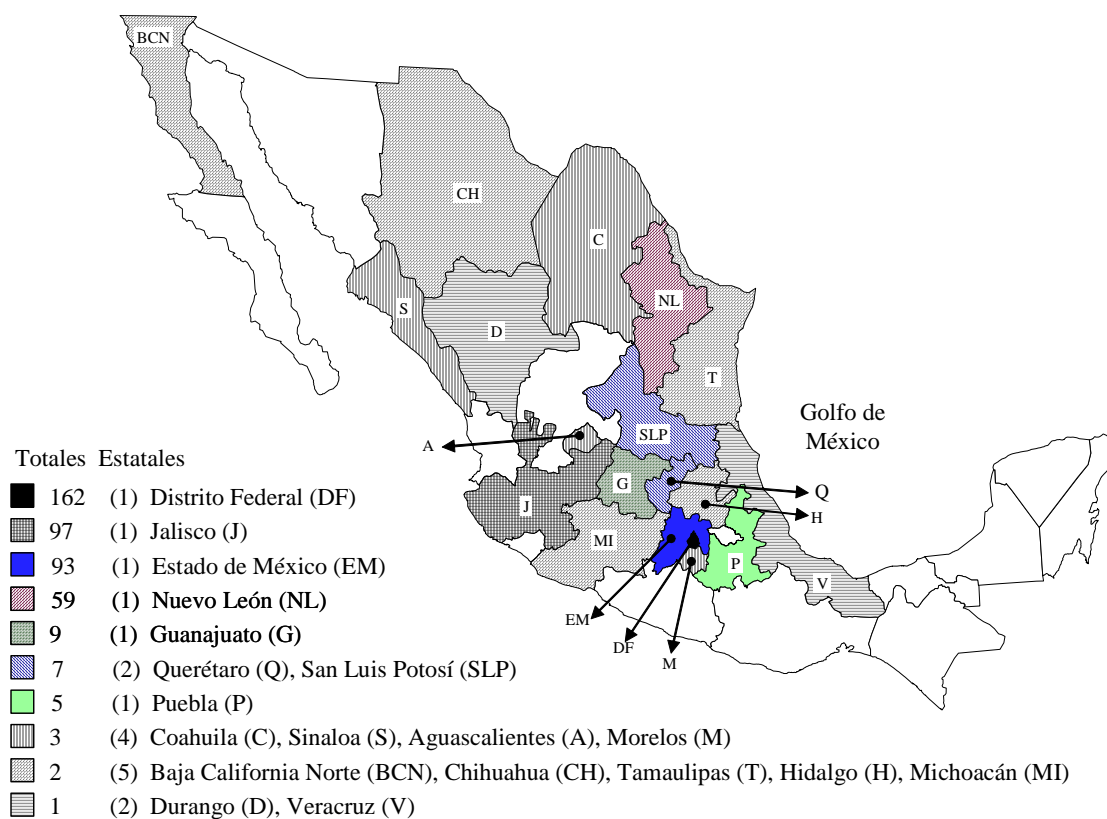


Figura 4.14
Distribución geográfica de las empresas de autopartes

Fuente: Román (2004).

Con todo y el declive en la fabricación de vehículos automotores entre el año 2000 y el 2004 en México, el sector de autopartes es un componente esencial de la industria manufacturera mexicana. En los últimos años, según la INA (2006), este sector se ha convertido en uno de los más dinámicos, participando con una proporción importante de las exportaciones no petroleras.

Brown (1999), establece que la producción de la industria de autopartes creció al mismo ritmo que la industria terminal desde los años ochenta a tasas superiores que las de la industria manufacturera. Entre 1980 y 1985 el PIB de la industria de autopartes creció a una tasa promedio anual del 4%. El periodo de mayor crecimiento se registró entre 1986 y 1990 con una tasa del 9% promedio anual, porcentaje que disminuyó en los noventa debido tanto a la crisis de 1995 como a las crecientes importaciones que se registraron ante la apertura económica y el Decreto Automotriz de 1989. La INA (2006), reporta que entre 1990 y 2004, el PIB de la industria de autopartes pasó de \$3,557 a \$8,530 millones de dólares (mdd) en términos constantes.

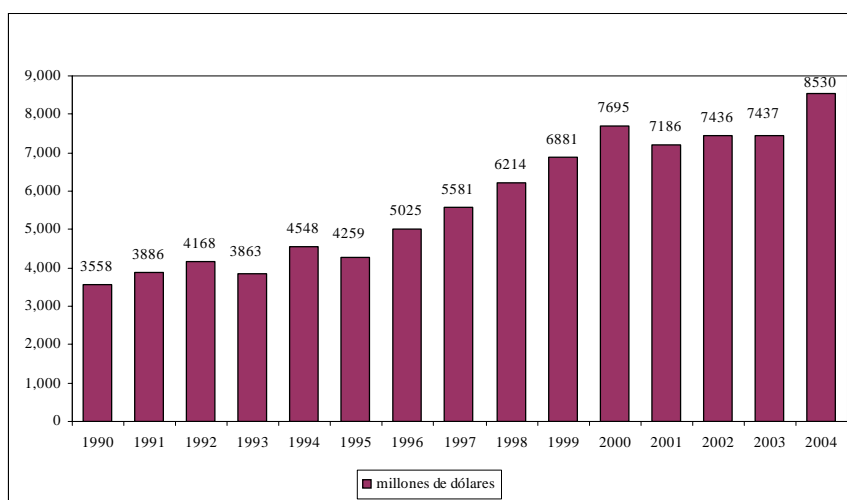


Figura 4.15
PIB del sector de las autopartes

Fuente: Adaptado a partir de INA (2006).

Con base en los datos que reporta la INA (2006), en términos de su contribución al PIB manufacturero, el sector de autopartes ha mantenido una participación relevante, siempre por arriba del 6%, e incluso llegando a más del 8% del PIB manufacturero en 2004, impulsada en gran medida por las exportaciones.

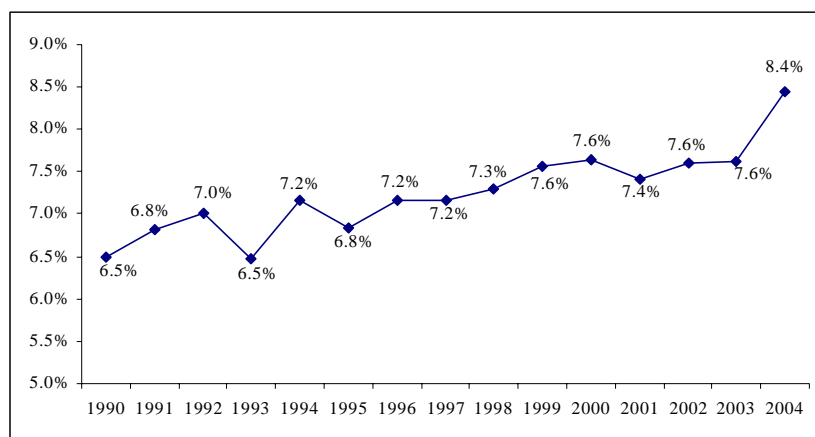


Figura 4.16
Participación anual del PIB de las autopartes respecto al PIB manufacturero

Fuente INA (2006).

Para llegar a las cifras anteriores, a partir de 1994 que se firmó el TLCAN hasta el 2004, la producción nacional de autopartes tuvo un crecimiento del 61%: pasó de \$13,893 mdd a \$22,419 mdd. La producción ha crecido a un ritmo promedio anual de 4.9% en los últimos 11 años, crecimiento superior al experimentado por la economía en su conjunto.

Desde 1994 el monto de la producción de este sector tuvo su peor año en 1995 alcanzando los \$11,120 mdd y su máxima producción en el año 2000 con \$21,617 mdd, período que antecedió a la recesión económica de Estados Unidos. Para el año de 2005, la Industria Nacional de Autopartes, A.C. (INA) estimó una producción de \$23,300 mdd lo cual significa un crecimiento anual de 3.9% (INA, 2006), superior a la del año 2000. Este crecimiento se debe al aumento en las exportaciones de componentes para automóvil, la diversificación de esos mercados y una mayor demanda interna de autopartes, entre otros factores.

Por otro lado, el sector de autopartes es también uno de los más dinámicos en términos de exportaciones no petroleras. Entre 1994 y 2004, las exportaciones de partes automotrices pasaron de \$4,470 a \$12,805 mdd, lo que significa un crecimiento de más de 186% en solo 11 años, todo ello, como resultado de haber logrado una tasa de crecimiento promedio anual del orden de 11.1%.

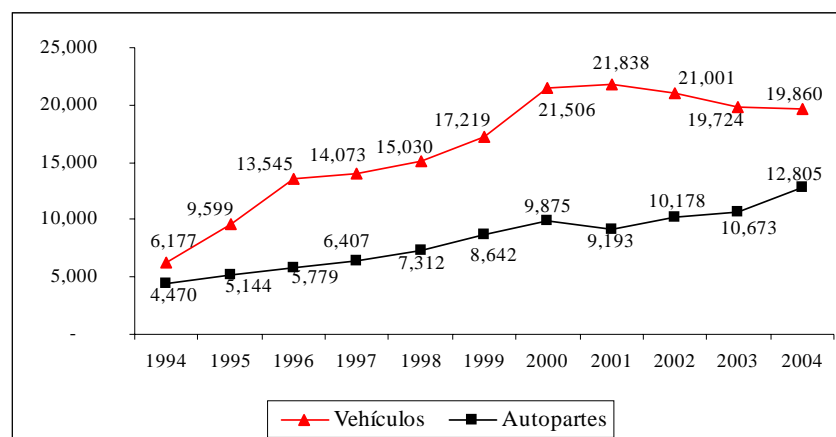


Figura 4.17
Exportación anual de vehículos y autopartes
 (millones de dólares)

Fuente: Adaptado a partir de INA (2006).

Es importante observar en la figura 4.17 que la brecha que existe entre las exportaciones de vehículos y el del sector autopartes tiende a reducirse de manera significativa, demostrando con ello la competitividad del sector.

En términos de la importancia en la industria manufacturera, las autopartes constituyen el segundo producto de mayor exportación del sector manufacturero, después de los vehículos. Al cierre del 2004, el sector de autopartes contribuyó con el 8.1% de las exportaciones manufactureras.

No obstante lo anterior, a pesar del dinamismo mostrado por esta industria, el déficit en la balanza comercial del sector autopartes ha sido permanente. Las razones de este comportamiento se explican en función de que esta industria nunca ha logrado alcanzar el dinamismo que caracteriza a la industria terminal que, por otro lado, fue mucho más favorecida por los cambios en los decretos sobre la materia y la firma del Tratado de Libre Comercio para América del Norte (TLCAN), en cuanto a facilidades para la importación de partes de componentes (Brown, 1999).

Según la INA (2006), en el 2004 las exportaciones directas del sector sumaron \$12,865 mdd; mientras que las importaciones ascendieron a \$15,486 mdd con lo que el saldo resulta en un déficit de \$2,621 mdd. No obstante este resultado negativo, el déficit comercial continúa disminuyendo, reduciéndose en 17.2% en comparación con el resultado de 2003. Para 2005, la INA estimó que las exportaciones de autopartes

ascendieron a \$14,085 mdd, mientras que las importaciones tuvieron un valor de \$14,856 mdd, resultando de ello un déficit comercial del sector de \$771 mdd.

Sin embargo, el hecho es que el mercado mexicano es muy amplio y necesita verse surtido por todo tipo de complementos y partes que en muchas ocasiones no pueden fabricarse en el propio país y tienen que ser importadas.

A nivel mundial, en el sector de autopartes el principal exportador es Estados Unidos con un 20.19% del mercado, seguida por Alemania con un 12.8% y Japón con un 11.32%. En la región del TLCAN contribuye al intercambio mundial en un 31%, siendo México uno de los países de mayor crecimiento en las últimas dos décadas (UNCTAD, 2004).

Cuadro 4.5
Participación de México en la exportación mundial de autopartes

Posición	País	Valor de las exportaciones	
		% del mundo	% del total del país
1	Estados Unidos	20.19	4.19
2	Alemania	12.80	3.20
3	Japón	11.32	3.99
4	Francia	8.10	4.01
5	Canadá	7.19	4.12
6	Italia	5.07	2.94
7	España	4.50	5.38
8	México	4.21	3.82
9	Bélgica	2.65	1.93
10	Rep. Checoslovaca	1.66	6.19
11	Austria	1.38	3.23
12	Brasil	1.08	2.62

Fuente: UNCTAD (2004).

En lo que se refiere al destino de las exportaciones, la venta de autopartes en el extranjero se concentra en cuatro países principalmente: Estados Unidos, Alemania, Brasil y Canadá. Es importante mencionar que México constituye el segundo país proveedor de autopartes más importante para los Estados Unidos, únicamente después de Canadá; desplazando a Japón del segundo lugar que ocupó hasta hace cuatro años (ICEX, 2005).

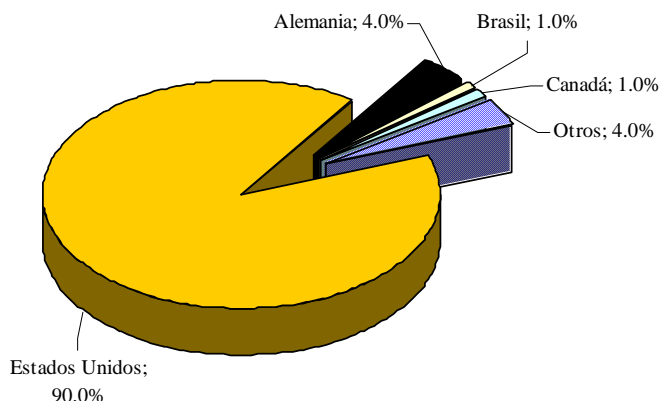


Figura 4.18
Destino de las exportaciones de autopartes

Fuente: ICEX (2005).

En términos generales, Estados Unidos supone una parte importante en el intercambio comercial de autopartes de México, debido fundamentalmente al TLCAN y a la instalación de muchas fábricas de vehículos de las principales empresas norteamericanas en la República Mexicana. Esta es también la razón por la que los intercambios con Alemania figuran en segunda posición, a pesar de que existe una planta importante de la Volkswagen en Puebla (México) y otras empresas alemanas que recientemente se han instalado.

Destaca también el papel de Brasil, a raíz del Acuerdo Automotriz del año 2003, que reactiva el intercambio en este sector. Del mismo modo, después de la firma del Tratado de Libre Comercio con la Unión Europea (TLCUE), se espera que el comercio entre estas dos regiones se intensifique ya que se brinda el acceso a exportadores europeos al mercado mexicano, así como el acceso de productos mexicanos al mercado europeo, con la disminución de los aranceles. Hoy en día los aranceles se encuentran entre un 3 y un 5%, y se reducirán a un 0% para el año 2007 (ICEX, 2005).

Por lo que respecta al tipo de autopartes con el mayor valor de la producción en México, el cuadro 4.6 muestra las estadísticas en el período de 1999 al 2004, del cual puede observarse que en el año 2004 los “motores y sus partes” tuvieron una participación relativa del 43.3%, las “partes y accesorios para el sistema eléctrico” de 17.6% y las “partes para el sistema de transmisión” con 10.2%; se observa también que a pesar del período de recesión de los Estados Unidos, localizado entre (1999 y 2004), todas las autopartes mantuvieron un ritmo de crecimiento entre 3% y casi 9%, con

excepción del rubro de “llantas y cámaras” (-4.0%), dando como resultado un crecimiento positivo promedio total de 5.7%.

Cuadro 4.6
Valor de la producción en la industria autopartes por clase de actividad para automóviles y camiones

Fabricación de:	Año (miles de dólares)						Part_rel (2004)	Prom.
	1999	2000	2001	2002	2003	2004 ef/		
Motores y sus partes	3,848,561	4,193,599	3,864,213	3,838,391	4,238,606	5,293,086	43.3%	
Tasa de crecimiento	-	9.0%	-7.9%	-0.7%	10.4%	24.9%		7.1%
Otras partes y accesorios	1,600,418	2,183,413	2,272,799	2,226,552	2,033,440	2,148,096	17.6%	
Tasa de crecimiento	-	36.4%	4.1%	-2.0%	-8.7%	5.6%		7.1%
Partes y accesorios para el sistema eléctrico automotriz	887,567	1,105,124	1,082,962	1,105,600	1,152,281	1,252,906	10.2%	
Tasa de crecimiento	-	24.5%	-2.0%	2.1%	4.2%	8.7%		7.5%
Partes para el sistema de transmisión	888,431	933,134	835,642	823,744	857,756	1,048,069	8.6%	
Tasa de crecimiento	-	5.0%	-10.4%	-1.4%	4.1%	22.2%		3.9%
Acumuladores y pilas eléctricas	389,405	453,377	490,152	493,886	519,125	587,833	4.8%	
Tasa de crecimiento	-	16.4%	8.1%	0.8%	5.1%	13.2%		8.7%
Partes para el sistema de suspensión	370,311	381,553	317,293	354,686	394,933	491,922	4.0%	
Tasa de crecimiento	-	3.0%	-16.8%	11.8%	11.3%	24.6%		6.8%
Llantas y cámaras	851,042	817,425	539,368	393,812	483,230	590,906	4.8%	
Tasa de crecimiento	-	-4.0%	-34.0%	-27.0%	22.7%	22.3%		-4.0%
Partes y accesorios para el sistema de frenos	329,678	390,325	375,073	404,428	417,267	447,683	3.7%	
Tasa de crecimiento	-	18.4%	-3.9%	7.8%	3.2%	7.3%		6.6%
Carrocerías y remolques	299,585	427,317	407,169	339,966	311,056	370,225	3.0%	
Tasa de crecimiento	-	42.6%	-4.7%	-16.5%	-8.5%	19.0%		6.4%
Total	9,464,998	10,885,267	10,184,671	9,981,066	10,407,695	12,230,727	100.0%	
Tasa de crecimiento	-	15.0%	-6.4%	-2.0%	4.3%	17.5%		5.7%

Notas: (1) ef/ = estimado por la fuente.

Fuente: elaboración propia con datos del INEGI (2005).

Evidentemente, las cifras en el cuadro anterior, demuestran que el sector de las autopartes en México goza de buena salud, y parece ser que su futuro es bastante prometedor, sin embargo, es importante alertar que a la falta de apoyos al sector empresarial, podría provocar un declive estrepitoso en el mercado, sobre todo porque no todas las empresas cuentan con los recursos y mecanismos suficientes para llevar a cabo planes a mediano y largo plazo, tal y como se describe en la sección a continuación. La pérdida del mercado podría significar un hecho irreversible del que difícilmente se podrían reponer debido a la alta competitividad internacional.

4.5.3 Operatividad del mercado mexicano

En el mercado mexicano, los cambios en el sector de la automoción no son muy diferentes al contexto mundial en los niveles más altos de la cadena de suministro. En general, esto se debe a que el sistema internacional trabaja como una especie de oligopolio, en donde se aprecia que las decisiones globales de las empresas ensambladoras sobre cambios en sus funciones, modifican de igual manera a los proveedores de primer nivel localizados en México, también transnacionales: pero afectan de manera importante las condiciones estructurales de los mercados, sobre todo, el de las empresas locales (proveedores de segundo, tercero y sucesivos niveles en la cadena de suministro).

En efecto, para México como en otros países, el problema principal parece ubicarse en el segundo y tercer nivel del sector automoción de la cadena de suministro, es decir, entre las empresas que abastecen autopartes pequeñas y medianas. Como se pudo constatar de las cifras antes analizadas, el desarrollo de este sector se debe en gran medida a las exportaciones de automóviles hacia los Estados Unidos, en donde se exige cierto nivel de contenido local, para ciertas líneas de producción en México. Esto hace que los ensambladores importen todas las partes necesarias para sus líneas de exportación. Además, el crecimiento del mercado de exportación de vehículos se debe también, en parte, a la baja demanda que presenta el mercado mexicano, y no exactamente a una estrategia gubernamental. De esta manera, cuando las grandes firmas ensambladoras y proveedores de primer nivel modifican sus requerimientos, aumentan la dependencia de las importaciones o el desarrollo de proveedores – los cuales en su mayoría son extranjeros establecidos localmente.

Generalmente, señalan Veloso y Soto (2001), en México este tipo de empresas (ensambladores y sus proveedores directos) no diseñan iniciativas específicas, y tampoco dedican tiempo alguno para ayudar a las empresas locales para que alcancen los niveles necesarios de operación que les permita mantenerse como sus proveedores. Como resultado de esto, muchas empresas, particularmente las de segundo y tercer nivel, no son capaces de modernizarse. Ello implica el ajuste de sus operaciones ya sea moviéndose al mercado de repuestos, o convertirse en distribuidores en lugar de productores.

Álvarez (2002) confirma lo anterior, y señala que las empresas locales del sector de las autopartes han dejado de ser proveedores de las ensambladoras para dejar su lugar a las nuevas empresas extranjeras o dedicarse a importar y distribuir autopartes, como es el caso de la industria llantera. Brown (1999), identificó que las actividades de cooperación y apoyo más importantes que reciben los proveedores mexicanos del segundo nivel de los del primer anillo son la información sobre cambios tecnológicos, actividades de control de calidad y el desarrollo de productos; sin embargo, advierte que entre los proveedores de primer y segundo nivel las relaciones de cooperación son muy limitadas, como puede observarse en el cuadro 4.7, el cual presenta los porcentajes que se obtuvieron al calcular el ratio entre la máxima puntuación posible y la obtenida por el conjunto de las empresas que fueron entrevistadas por este autor.

Cuadro 4.7
Apoyos que reciben los proveedores del segundo nivel de los del primero

Núm.	Concepto	Empresas nacionales	Filiales de empresa extranjeras
1	Pagos adelantados	25%	25%
2	Organización de la producción	35%	63%
3	Entrenamiento técnico y operacional	40%	13%
4	Información sobre cambio tecnológicos	60%	63%
5	Información sobre formas de gestión	35%	50%
6	Uso de laboratorio	20%	0%
7	Préstamo de maquina y equipos	20%	38%
8	Compras conjuntas de insumos	25%	13%
9	Apoyo para el acceso a líneas de crédito	20%	13%
10	Apoyo en actividades de control de calidad	70%	100%
11	Apoyo para el desarrollo de productos	50%	63%

Fuente: Brown (1999).

Aún cuando se sabe que en el desarrollo de proveedores, cualquier apoyo es incondicional y todas las actividades aportan beneficios para ambas partes. Particularmente, y con base en la información en el cuadro 4.7, puede percibirse que las actividades que mayor apoyo ofrecen los proveedores de primer nivel, representan las que más beneficios directos pueden obtener. Afortunadamente, en fechas recientes, Mortimore y Barron (2005) encontraron que algunas empresas extranjeras ya asisten a sus proveedores para que mejoren su desempeño, sin embargo, insiste en que las empresas mexicanas tienden nada más a recibir capacitación más que a ofrecerla.

Sin embargo, Brown (1999) aclara que las empresas del primer nivel temen no lograr recuperar la inversión realizada en el desarrollo de un proveedor, cuestión que no

propicia las condiciones para la cooperación. Esto se debe a que las empresas de segundo nivel y sucesivos, no cuentan con los recursos para invertir en el desarrollo de sus capacidades y habilidades para acceder a este nicho de oportunidad.

En México, alrededor de 1,500 empresas de suministro de autopartes se encuentran en el segundo y tercer nivel. Un número significativo de este tipo de empresas no son lo suficientemente grandes para producir una escala mínima de bienes, y algunas carecen de capacidad en términos de calidad y de respuesta (Veloso y Soto, 2001). Esto provoca que los ensambladores importen una cantidad importante de autopartes, particularmente para sus líneas de exportación, impidiendo un crecimiento más formal de la base empresarial del sector autopartista. Esto hace que la estructura empresarial en México presente una base de apoyo muy débil (véase figura 4.19).

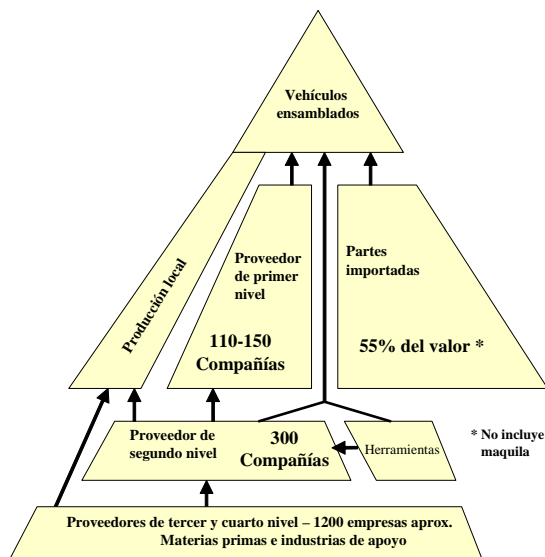


Figura 4.19
Pirámide del sector de la automoción mexicana

Fuente: Veloso y Soto (2001).

En cierta forma, a nivel internacional no sorprende el hecho de que los proveedores nacionales también importen una gran proporción del valor de sus ventas. Por ejemplo, las plantas de ensamble de Ford en México (Cuautitlán y Hermosillo), funcionan apoyándose básicamente en importaciones, es decir sus niveles de aprovisionamiento con empresas operando en México avanza lentamente (Contreras, 2005). La mayor parte de las compras nacionales se hacen para las plantas de ensamble de Cuautitlán y Chihuahua (motores), en tanto que los niveles de proveeduría nacional

en Hermosillo son aún incipientes y la mayor parte se satisface con importaciones (Juárez, 1999).

Por este motivo, la preocupación expresada por algunos analistas de la industria, es que la base de suministro mexicana se reduzca, debido a que el tratado de libre comercio (TLCAN) establece la desaparición de las restricciones de valor añadido desde el 2004.

Las pocas empresas más importantes que pertenecen al sector de las autopartes en México, se caracterizan por exportar directa e indirectamente la mayor parte de su producción, pudiendo llegar a surtir al mercado de repuesto mexicano, lo que les permite operar a escalas óptimas. Realizan actividades de investigación, desarrollo de tecnología y nuevos productos. Establecen alianzas con empresa extranjeras con el propósito de acceder a nuevos mercados, contar con tecnologías e incrementar su escala de producción. Su mezcla de productos es amplia y puede ir de 100 a 600 productos. No han establecido actividades de producción de tipo modular debido al tamaño de las líneas de montaje, que no permiten espacio suficiente para que los proveedores trabajen alrededor de éstas, y por la intervención de los sindicatos que han luchado en contra de la reducción de plazas (Álvarez, 2002).

Veloso y Soto, (2001), concluyen que este tipo de proveedores de primer nivel van a ser capaces de sobrevivir y desarrollarse. Alertan que los proveedores de segundo nivel y sucesivos, ya enfrentan serias dificultades, las cuales van ha empeorar una vez la liberación llegue a su total plenitud.⁸ Especulan que la ausencia de las exigencias impuestas por el Estado, el contenido local puede bajar entre 20% y 30% en México.

A partir de las encuestas aplicadas a una muestra de empresas de este sector industrial, Mortimore y Barron (2005), encontraron que el contenido nacional de las empresas del primer nivel de la cadena aumentó de 34.7% en 1994 al 42.7% en el 2002 y estimaron que podría llegar al 49.1% en el 2006; sin embargo, perciben que el papel de la política nacional en esta meta no está muy clara. En general las empresas de este tipo de proveedores tienen opiniones mucho más favorables que las empresas de segundo y tercer nivel. Dado que estas últimas son en su mayoría mexicanas, dan la

⁸ Incluye, la reducción o eliminación de los aranceles de los requerimientos de contenido local, a los límites de la integración vertical, y las restricciones de inversión extranjera.

impresión que su situación competitiva refleja que no se sienten incorporadas, incluso algunas se sienten perjudicadas por la apertura de la industria.

Por otro lado, se ha demostrado que las empresas compradoras de autopartes y sus insumos elaborados en México, suelen ser sumamente exigentes y cuidadosas con respecto a la certificación de calidad y en la comprobación de la eficiencia en el desempeño operacional de sus proveedores (BANCOMEX, 2005). Es normal que los proveedores deban poseer una calificación de calidad mínima (ISO 9000, ISO 14000, QS9000, etc.) más una mayor (TS16949, Q1 mayor que 800, etc.), un volumen de ventas mínimo, un grado de especialización mínima y capacidades tecnológicas mínimas, entre otras cosas, simplemente para calificarse y postularse como proveedores. Casi todos los compradores miden la calidad, el servicio y el precio de los productos de sus proveedores locales de manera rigurosa.

Sólo si los proveedores locales cumplen con estas exigencias de calidad, servicio y precio de los compradores puede extenderse la cobertura y mejorar la calidad de la base de proveedores en México. No obstante, muchos proveedores mexicanos están lejos de cumplir con estas exigencias (Mortimore y Barron, 2005).

En relación con las actividades de logística, Álvarez (2002) encontró que las empresas mexicanas del sector autopartista han reducido sus tiempos de entrega abasteciendo pequeños lotes con mayor frecuencia y que la rotación de los inventarios se ha modificado pasando de 51 días de venta en 1991 a 34 días en 1999. En general, la tendencia es bajar el número de días de inventario, pero se observa variaciones relacionadas con el incremento de repuestos. No se sabe si esta disminución de inventarios está relacionada con las entregas *justo a tiempo*, ni que nivel de proveedores tienen menores índices de rotación de inventarios. Cuando los proveedores no tienen sistemas *justo a tiempo* se contratan empresas internacionales que se establecen como centros de acopio cerca de las plantas. Estas empresas son especialistas en manejo de materiales y son las encargadas de entregar *justo a tiempo* en la planta.

4.6 Conclusiones

A partir de la información recabada y del perfil que las estadísticas describen, da la impresión de que la movilidad mundial de la industria de la automoción será

permanente. Varias décadas han pasado y los sectores empresariales de esta industria continúan moviendo la localización de sus plantas hacia sitios que consideran cada vez más “estratégicos”. Esta tendencia apunta hacia una mayor distribución geográfica de la industria, guiada especialmente por las inversiones internacionales de las mayores empresas del sector (Cortegiano, 2000). Ante esta actitud, las empresas más importantes, como los ensambladores de automóviles, generan una serie de efectos directos en el contexto mundial.

Los cambios efectuados en la organización de la producción de vehículos automotores no sólo obedecen a la satisfacción de las empresas y a las medidas macroeconómicas de los países, sino también a cambios en la demanda. Estos cambios provocan a las empresas internacionales la búsqueda de nuevas estrategias empresariales y de organización, no sólo al interior de ellas, sino entre compañías a nivel global, abarcando el ámbito local y regional.

En efecto, en el ámbito del comercio internacional y empresarial de la industria de la automoción, se ha producido un vuelco de enorme trascendencia en la gestión de la producción y en el intercambio de autopartes y componentes. Tal situación ha originado la dispersión de la producción y la ampliación geográfica de los mercados, lo cual ha conformando grandes sistemas de producción y complejos esquemas operativos. Estos esquemas buscan atender los flujos mundiales generados por demanda de productos en un entorno económico excesivamente dinámico.

La movilidad de la industria de la automoción obedece también a un nuevo paradigma que responde a los recientes enfoques de desarrollo empresarial surgido a partir de la liberación de los mercados: la competitividad. Una mayor apertura, trajo consigo el reordenamiento de la producción, lo cual a su vez, modifico los flujos comerciales que dieron pauta a la conformación de grandes cadenas de suministro de este sector.

Los cambios más significativos en la industria de la automoción a que se refiere el párrafo anterior han modificado las estructuras de los mercados internacionales. La localización y el nivel de fragmentación de la producción, han promovido el surgimiento de nuevos mercados (consumo); modificado los flujos internacionales de distribución física, y han cambiado el diseño de los sistemas de abasto y distribución de

los productos; en las naciones, han impactado en las variables macroeconómicas, laborales e incluso en los planes gubernamentales. Por tanto, la importancia del sector de la automoción a nivel mundial es definitiva.

En términos generales, los ensambladores han adoptado diferentes estrategias con el propósito de superar los inconvenientes encontrados en sus esquemas de relocalización; para cumplir con sus expectativas y los de la demanda, han condicionando y reorganizando las operaciones y funciones al interior de su cadena de suministro, afectando a sus proveedores y a los proveedores de sus proveedores: es decir, al sector autopartistas.

La política trazada por las grandes compañías ensambladoras de automóviles en busca de reducir sus costes, ha propiciado un aumento del nivel de competitividad que ha alcanzado a las empresas del sector autopartista en forma de presión, toda vez que las partes y componentes de los vehículos constituyen entre un sesenta y setenta por cien del coste total de producción, para mantenerse en el mercado, las empresas autopartistas deberán cumplir con los requisitos cada vez más exigentes para optimicen dichos costes.

Desafortunadamente, el cambio no ha llegado a todos los niveles de la cadena de suministro. Así, por ejemplo, la capacidad tecnológica del sector de las autopartes parece alcanzar cierta madurez para las empresas del primer anillo, pero no para las de segundo nivel y sucesivos, pues parece no existir los apoyos suficientes para adquirir los niveles que exigen los proveedores de primer nivel y ensambladores. No obstante algunas empresas de este sector han mostrado un auge en términos de sus niveles de exportación. Los cambios realizados les han permitido modificar una producción con altos costes, falta de flexibilidad para el cambio, calidad deficiente y altos rechazos, por una que hoy en día es considerada como producción de “clase mundial” por su calidad, confiabilidad y métodos de producción flexible. No obstante esta visión, la mayoría de las empresas adolece de lo contrario.

Específicamente, para el sector industrial de la automoción en México, el entorno internacional es un factor del que ha recibido gran influencia, pues a partir de la dinámica mostrada por los ensambladores de automóviles en los últimos años, México se ha convertido en un protagonista a escala mundial. No obstante, la localización de un

mayor número de ensambladoras no ha sido suficiente para detonar en definitiva el sector de las autopartes.

Reconociendo el hecho de que el sector de la automoción está experimentado un proceso de consolidación a escala global, y que está expuesto a una presión creciente y continúa, supone la re-configuración de los esquemas de aprovisionamiento (logística *inbound*), producción, y abastecimiento (logística *outbound*) y sus sistemas de gestión en todos los niveles de la cadena.

Estos cambios en los esquema de aprovisionamiento y distribución, ahora son relevantes en el sentido de que los flujos más importantes se dan a nivel internacional y su impacto en la gestión empresarial son de tal importancia, que una empresa puede quedar fuera del mercado en caso de no realizar planes adecuados de gestión. En países como México, donde la base empresarial está constituida principalmente por pequeñas y medianas empresas, esta situación es particularmente relevante.

La evolución de la industria automotriz mexicana consta de tres marcadas etapas. La tercera etapa de la evolución parece ser la más importante ya que permitió su consolidación. En el sector de la automoción y autopartista en México, puede decirse que a partir de la firma del TLCAN, las empresas ensambladoras reubicaron su producción en distintas zonas de la región de América del Norte, originando un aumento en la producción de vehículos y camiones ligeros en México, además de transferir plataformas de producción especializadas para abastecer el mercado estadounidense, impulsando así un comercio intrafirma. En realidad, esto significa que el aumento de la producción en México no se debe a las capacidades de las empresas establecidas localmente para los mercados de exportación, sino a cambios en las estrategias de las empresas ensambladoras de transferir o reubicar parte de su producción.

Diversas son las repercusiones de las acciones emprendidas de las ensambladoras de automóviles sobre la base industrial de sus proveedores. Una de las más relevantes es la forma de administración de los flujos de abastecimiento y de gestión de los inventarios. En este contexto, el mecanismo tradicional con el que mejores resultados han obtenido los ensambladores de automóviles se basa los diversos esquemas derivados del sistema *justo a tiempo*.

Para Leavy (1994), el sistema de aprovisionamiento ajustado implica también una forma diferente de gestionar los proveedores que en su correcta implantación parece generar beneficios para las dos partes. Sin embargo, otros autores han criticado el aprovisionamiento ajustado por los efectos negativos que tiene sobre el proveedor (Oliver, 1991; Turnbull, 1988; Turnbull, *et al*, 1992; Rainnie, 1991).

González (2001) reporta que estos autores se centran en la gestión de inventarios, argumentando con evidencia empírica que el aprovisionamiento ajustado, en muchos casos, es una simple excusa para transferir los inventarios a los proveedores. Smith y Walter, Jr. (2000), dedujeron que el 65.5% de los proveedores que analizaron tuvieron un incremento de sus inventarios con la implementación de este sistema. Un alto porcentaje de proveedores de las empresas ensambladoras de automóviles en América, Europa y Japón piensan así (Sako, *et al*, 1995). En México, se ha identificado que los proveedores de segundo nivel, por ejemplo, no se sienten integrados a este tipo de esquemas.

Independientemente de esta posición, y a la vista del crecimiento tan explosivo que ha tenido el sector de la automoción, es evidente que los esquemas de organización y de gestión logística utilizados por los ensambladores les ha dado resultado.

En particular, la característica principal de este esquema es que permite reducir el coste total de gestión en los niveles de producción más cercanos al ensamble final de los automóviles. Sin embargo, parece no controlar todos aquellos esquemas que utilizan los eslabones más alejados de esta etapa. Esto último se debe a la gran cantidad de empresas que conforman la cadena de suministro en los niveles inferiores, como en el caso del sector autopartista.

Los trabajos dedicados al estudio de las relaciones empresariales entre proveedores de primero y segundo nivel son muy escasos, y no se diga de los niveles más alejados. Pocos estudios que atienden el problema apenas permiten identificar ciertas conductas entre estos niveles empresariales.

Por ejemplo, Krause (1997) encontró que los clientes perciben que la calidad de sus proveedores y el desempeño de sus entregas mejoran como resultado de las actividades que ellos realizan. Para demostrar esto último, Park y Hartley (2002)

utilizaron técnicas estadísticas en un estudio del sector de la automoción en Corea, donde evaluaron la influencia entre los miembros de la cadena de suministro. Los resultados mostraron que la gestión de los proveedores de segundo nivel se mejora cuando los proveedores de primer nivel ponen mayor énfasis en la construcción de relaciones de largo plazo. Asimismo, demostraron que el trabajo del proveedor de segundo nivel afecta significativamente la calidad y el desempeño de entregas del proveedor de primer nivel.

En efecto, las relaciones entre proveedores y clientes en la cadena, ahora basadas en sistemas mucho más avanzados, requieren de procesos integradores en todas las fases del sistema de producción del sector de la automoción. Para responder a este entorno cada vez más exigente y cambiante, Sachon y Albiñana (2004) recomiendan que las empresas del sector deben invertir en mejorar la eficiencia de su cadena de suministro, formada por todos los agentes involucrados en el desarrollo, fabricación, soporte y mantenimiento de productos y servicios, etc.

La falta de interés por el desarrollo de proveedores quizá se deba a la idea de que el impacto económico y de suministro en toda la cadena es mínimo, y a la aparentemente poca repercusión en los ensambladores finales. Cabe señalar que en estos niveles, el grado de dependencia de un único proveedor es mucho menor en comparación con los primeros eslabones de la cadena del sector automoción.

Esto lleva, en cierta forma, a cuestionar si esta parte de la cadena está operando adecuadamente. O dicho de otra manera, ¿El aprovisionamiento ajustado es la mejor solución para todos los componentes o partes del vehículo y niveles empresariales en la cadena de suministro del sector automoción? Mientras el sistema *justo a tiempo* tiene una enorme aceptación y ha sido ampliamente demostrada la efectividad de su funcionamiento, el suministro programado, que utilizan comúnmente las empresas autopartistas, parece olvidado en este sector.

Los estudios relacionados al sector de las autopartes, comúnmente analizan su funcionamiento a nivel global, en un contexto general cuya enfoque principal se centra en la trascendencia económica que representa para los países donde se localiza. Este sector, por tanto, es una buena oportunidad para estudiar su gestión logística y el papel real que desempeña en la cadena de suministro del sector de la automoción. Buscar

soluciones acerca del tipo de relaciones que deben desarrollar, las estrategias que deben emplear para administrar sus inventarios, así como sus esquemas de producción y distribución, se convierten en un imperativo que debe ser abordado.

Referencias

1. (Aláez, 1996) Aláez, R., Bilbao, J., Camino, V. y Longás, J.C. (1996) "El sector de automoción: nuevas tendencias en la organización productiva". Ed. Civitas. Madrid.
2. (Alford, *et al*, 2000) Alford, Dave, Sackett, Peter y Nelder, Geo (2000). "Mass Customisation - an Automotive Perspective". *International Journal of Production Economics*; vol. 65, pp. 99-110.
3. (Alonso y Vázquez, 2006) Alonso, M. José L. y Vázquez, Xosé H. (2006). "Estrategias de aprovisionamiento en el sector español del automóvil: situación actual y perspectivas". *Universia Business Review-Actualidad Económica*. Primer Trimestre 2006 | ISSN 1698-5117.
4. (Alternburg, *et al*, 1999) Alternburg, K., Griscom, D., Hart, J., Smith, F., y Wohler, G. (1999). "Just-In-Time Logistics Support for the Automobile". *Industry Production and Inventory Management Journal*, Second Qtr., pp. 59-66
5. (Álvarez, 2002) Álvarez, Ma. de Lourdes (2002). "Cambios en la industria automotriz frente a la globalización: el sector de autopartes en México". *Revista Contaduría y Administración*, No. 206, julio-septiembre, pp. 29-49.
6. (Anderson y Pine, 1997) Anderson, D. M. y Pine, B. J. II (1997). "Agile Product Development for Mass Customization, Niche Markets, JIT, Build-to-Order and Flexible Manufacturing". Ed. McGraw-Hill.
7. (BANCOMEXT, 2006) BANCOMEXT (2006). "Proyectos de exportación, 2006". Página web: <http://www.bancomext.com>.
8. (Belzer, 2000) Belzer, Michael H. (2000). "Driver Background Paper: Current and Future Trends". Federal Motor Carrier Safety Administration (FMCSA) or the U. S. Department of Transportation (DOT). Revised and resubmitted: November 17.
9. (Bianchi y Lee, 1999) Bianchi, Patrizio y Lee, Miller (1999). "Innovación y territorio". Editorial Jus, México.
10. (Bouvard, *et al*, 2002) Bouvard, F., M. Cesari y J. Luciat-Labry, "Retooling the Way to Profitable Growth". McKinsey Research. Página web: <http://www.autoassembly.mckinsey.com>.
11. (Brown, 1999) Brown Grossman, Flor (1999) "La industria de autopartes mexicana: reestructuración reciente y perspectivas". División de Desarrollo Productivo y Empresarial de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo (CIID/IDRC).
12. (Brunnermeier y Martin, 1999) Brunnermeier, Smita B. y Martin, Sheila A (1999). "Interoperability Cost Analysis of the U.S. Automotive Supply Chain". Research Triangle Institute Center for Economics Research. Research Triangle Park, NC 27709 (Final Report).
13. (Camino, 2004) Camino B. Vicente (2004) "El sector de automoción en Castilla y León. Componentes e industria auxiliar". Premio Colección de Estudios del Consejo Económico y Social de Castilla y León. Edición 2004.
14. (Carrillo y González, 1999) Carrillo, Jorge y González L. Sergio (1999). "Relaciones cliente-proveedor de empresas automotrices alemanas en México". *Actes du GERPISA* n° 25.
15. (Chaparro, 2002) Chaparro, Eva (2002). "Llegan los autos inteligentes". *CONTACTO Magazine*. 21 de marzo de 2002. Página web: <http://www.contactomagazine.com/autos0321.htm>.

16. (Contreras, 2005) Contreras, Oscar F. (2005). "Cadena de suministros y proveedores locales en Ford Hermosillo". Fundación México Estados Unidos para la Ciencia – El Colegio de Sonora (FUMEC).
17. (Cortegiano, 2000) Cortegiano, J. Geraldo (2000). "Recursos humanos y localización de la producción en la industria automovilística mundial". Scripta Nova. Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales. Universidad de Barcelona [ISSN 1138-9788]. N° 72, 15 de septiembre de 2000. Página web: <http://www.ub.es/geocrit/sn-72.htm>.
18. (Domínguez, *et al*, 1995) Domínguez Machuca, J. A.; García González, S.; Domínguez Machuca, M. A.; Ruíz Jiménez, A. y Alvarez Gil, M. J. (1995). "Dirección de operaciones. Aspectos tácticos y operativos en la producción y los servicios". McGraw-Hill, Madrid.
19. (Ferguson, 2002) Ferguson, Lisa A. (2002). "An Analysis of JIT using the Theory of Constraints (TOC)". Decision Sciences Institute 2002. Annual Meeting Proceedings. Nova Southeastern University Wayne Huizenga Graduate School of Business and Entrepreneurship.
20. (Fernández, *et al*, 2006) Fernández, S. Esteban, Avella, C. Lucía, y Fernández, B. Marta (2006). "Estrategia de producción". McGraw Hill. 2ª. Ed.
21. (Fine y Whitney, 1996) Fine, Charles H., y Whitney, Daniel (1996). "Is the Make-Buy Decision Process a Core Competitiveness?". Working paper. Cambridge, MA: MIT Center for Technology, Policy, and Industrial Development. http://imvp.mit.edu/papers/96/Make_Buy.pdf
22. (Fine, *et al*, 1996) Fine, Charles H, Lafrance, John C. y Hillebrand, Don (1996). "The U.S. Automobile Manufacturing Industry" Meeting the Challenge: U.S. Industry Faces the 21st Century; p. 35.
23. (Flynn, *et al*, 1996) Flynn, Michael S., Bruce M. Belzowski, Bram Bluestein, Michael Ger, Manfred Tuerks, and John Waraniak. (1996). "The 21st Century Supply Chain: Changing Roles, Responsibilities and Relationships in the Automotive Industry." Chicago: A.T. Kearney, Inc.
24. (Follis y Enrietti, 2001) Follis, Massimo y Enrietti, Aldo (2001). "Improving Performances at the Second Tier of the Automotive Supply Chain A Draft Case Study of an Innovative Initiative in the Italian Car Industry". Actes du GERPISA n° 33.
25. (Frigant, 1995) Frigant, V. (1995). "Les espaces du juste-à-temps: une approche en termes de proximité organisationnelle et circulaire". Colloque International de l'ASRDLF. Toulouse.
26. (García y Taboada, 2005) García, G. Alejandro y Taboada, I. Eunice L. (2005). "La coordinación de recursos en la industria de los asientos automotrices: el caso de Lear Tláhuac". Problemas de Desarrollo. Revista Latinoamericana de Economía; vol. 36; núm. 143, octubre-diciembre.
27. (Gereffi, 2001) Gereffi, Gary (2001). "Las cadenas productivas como marco analítico para la globalización". Problemas para el Desarrollo. vol. 32, núm. 125. IIEC-UNAM, México.
28. (Giménez, 2000) Giménez, T. Cristina (2000). "Grado de desarrollo de la gestión de la cadena de suministros y sus relaciones de colaboración en el sector de distribución español". Universidad de Barcelona.
29. (González, 2000) González, B. Javier, (2000). "La gestión de compras y la organización del aprovisionamiento en la industria de automoción: un análisis descriptivo de los cambios más recientes". Departamento Administración y Economía de la Empresa Universidad de Salamanca, España. Página web: <http://www.unizar.es/eueez/cahe/gonzalezbenito1.pdf>.
30. (González, 2001) González, B. Javier (2001). "Prácticas productivas y de aprovisionamiento en la industria de automoción. La importancia de la posición en la cadena de valor". Departamento Administración y Economía de la Empresa Universidad de Salamanca. España.
31. (Gordon, 1995) Gordon, J. (1995) "Partnership Strategies for Market Success: the Auto Industry Provides Insights into Effective Partnerships Between Original Manufacturers and Parts Suppliers". Business Quarterly; vol. 60, num. 1, p91.

32. (Guerrero, *et al*, 2004) Guerrero, V. Salvador, Oviedo, G. Rodrigo, Vela, C. Mayra y Betanzos, O. Ricardo (2004) “La industria automotriz México-Querétaro”. Dirección de Comercio y Estudios Económicos de la Secretaría de Desarrollo Sustentable. Gobierno del Estado de Querétaro, México.
33. (Hahn, *et al*, 2000) Hahn, Chan K, Duplaga, Edward A, y Hartley, Janet L. (2000) “Supply-Chain Synchronization: Lessons from Hyundai Motor Company”. *INFORMS*; vol. 30, issue: 4, pp. 32-45.
34. (Handfield, *et al*, 2004) Handfield, Robert, Barnhardt, Robert y Powell, Nancy (2004). “Mapping the Automotive Textile Supply Chain: The Importance of Information Visibility”. *Journal of Textile and Apparel, Technology and Management*; vol. 3, Issue 4, Winter 2004.
35. (Harrison, 2002) Harrison, Joan (2002). “Consolidation Reconfigures The Automotive Industry Landscape”. *Mergers & Acquisitions: The Dealmakers Journal*, 6/1/2002. Página web: <http://www.bain.com/bainweb/home.asp>.
36. (Holweg y Miemczyk, 2003) Holweg, Matthias y Miemczyk, Joe (2003) “Delivering the ‘3-day car’—the Strategic Implications for Automotive Logistics Operations”. *Journal of Purchasing & Supply Management*; vol. 9, pp. 63–71.
37. (Holweg, *et al*, 2005) Holweg, M, Disney, S, Holmstro, J, y Smáros, R. (2005). “Supply Chain Collaboration: Making Sense of the Strategy Continuum”. *European Management Journal*; vol. 23, num. 2, pp. 170–181.
38. (Hsuan, 1998) Hsuan, Juliana (1998) “Modularization in Black-Box Design: Implications for Supplier-Buyer Partnerships”. Paper prepared for the DRUID Winter Conference.
39. (Humphrey y Memedovic, 2003) Humphrey, John y Memedovic, Olga (2003). “The Global Automotive Industry Value Chain: What Prospects for Upgrading by Developing Countries”. *Sectoral Studies Series*. United Nations Industrial Development Organization.
40. (ICEX, 2005) ICEX, 2005. “El mercado de partes y componentes de automoción en México”. *Notas Sectoriales*. Oficina Económica y Comercial de la Embajada de España en México.
41. (IECE, 2004) Instituto Español de Comercio Exterior (2004). “El sector autopartes en México”. Instituto Español de Comercio Exterior. Oficina Económica y Comercial de la Embajada de España en México. *Informes Sectoriales*
42. (IMF, 2004) IMF (2004). “Auto Report 2004”. *International Metalworkers’ Federation*.
43. (INA, 2006) INA (2006). “El sector de autopartes en México: Importancia del Sector”. *Industria Nacional de Autopartes, A. C.*
44. (INEGI, 2005) INEGI (2005). “La industria automotriz en México”. Edición 2005. INEGI Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Información.
45. (Jiménez, 2004) Jiménez, S. Elías (2004). “Supply Chain a bordo, destino a la integración”. *Énfasis Logística*; Año V, núm. 53, Noviembre.
46. (Jiménez, 2006) Jiménez S. Elías (2006). “Las PyMES también pueden”. *Revista Negocios internacionales BANCOMEXT*. Año 15, Número 168, pp 18-20, Marzo.
47. (Juárez, 1999) Juárez, N. Huberto (1999). “Enfrentando el cambio- Confronting Change”. 2ª. Ed. WSU.BUAP.
48. (Krause, 1997) Krause, D.R. (1997). “Supplier Development: Current Practices and Outcomes,” *International Journal of Purchasing and Materials Management*; vol. 33, num 2, pp. 12-19.
49. (Lambert y Gardner, 1996) Lambert, Emmelhainz, M y Gardner, J. (1996). “Developing and Implementing Supply Chain Partnerships”. *The International Journal of Logistics Management*; vol. 7, num. 2.
50. (Lambert, 2001) Lambert, Douglas M. (2001). “The Supply Chain Management and Logistics Controversy”. Editado por A. M. Brewer, *et. al*, en “*Handbook of Logistics and Supply Chain Management*”. Elsevier Science Ltd.
51. (Lamming, 1993) Lamming, Richard (1993). “Beyond Partnership Strategies for Innovation and Lean Supply”. Prentice Hall International, UK.

52. (Lara, *et al*, 2005) Lara, R. A, Trujado, G y García, Alejandro (2005). "Producción modular y coordinación en el sector autopartes en México. El caso de a red de plantas Lear Corporation". *Región y Sociedad*; vol XVII, núm. 32, El Colegio de Sonora, ISS 0188-7408. página web: <http://lanic.utexas.edu/project/etext/colson/32/2lararivero.pdf>
53. (Leavy, 1994) Leavy, B. (1994). "Two Strategic Perspectives on the Buyer-Supplier Relationship". *Production and Inventory Management Journal*; vol. 35, num. 2, pp. 47-51.
54. (Liker, 2004) Liker, Jeffrey (2004). "The Toyota Way". McGraw-Hill.
55. (López, 2002) López, Mercedes (2002). "Coches hasta en el Híper". *Rev. Electrónica Tráfico del Motor*.
56. (Maceira, 2003) Maceira, Daniel (2003). "Industria de autopartes: costos de transacción y competitividad en el sector autopartista Argentino". Estudio I.EG.33.6; Préstamo BID 925/OC-AR. Pre II. Coordinación del Estudio: Oficina de la CEPAL-ONU en Bs As, a solicitud de la Secretaría de Política Económica, Ministerio de Economía de la Nación.
57. (Martínez y Pérez, 2004) Martínez, S. Ángel y Pérez P. Manuela (2004) "Evolución de la relación fabricante-proveedor del automóvil: modelos teóricos y evidencia empírica". Departamento de Economía y Dirección de Empresas. Universidad de Zaragoza. Seminario Nueva configuración de la empresa industrial: Implicaciones para el sector de componentes del automóvil. Fundación Eduardo Barreiros y la Universidad Complutense de Madrid. 26 de abril de 2004.
58. (Mehra e Inman, 1992) Mehra, S. y Inman, Ed R. A. (1992). Determining the Critical Elements of Just-in-Time Implementation. *Decision Sciences*; vol. 23, num. 1, pp. 160-174.
59. (Milligan, 2000) Milligan, B. (2000). "JIT Works, But Still Has Bugs". *Purchasing*; vol. 129, num. 11, pp. 23-34.
60. (Monden, 1988) Monden, Y. (1988). "El sistema de producción de Toyota". Ed. CDN, Madrid.
61. (Mortimore y Barron, 2005) Mortimore, Michael y Barron, Faustino (2005). "Informe sobre la industria automotriz mexicana". Serie Desarrollo Productivo. Núm. 162, CEPAL. Publicación de las Naciones Unidas ISSN impreso 1020-5179; ISSN electrónico 1680-8754.
62. (Murphy, 1999) Murphy, T. (1999). "JIT: When ASAP Isn't Good Enough". *Ward's Auto World*; vol 35 num. 5, pp. 67-73.
63. (Murray y Dowell, 1999) Murray y Dowell (1999) "Examining Supply Gaps and Surpluses in the Automotive Cluster in Tennessee". Prepared by the Center for Business and Economic Research. College of Business Administration. The University of Tennessee Knoxville, Tennessee.
64. (Ocaña, 1992) Ocaña, C. (1992). "Costes de transacción en la organización de la producción: integración vertical, Just-in-Time y mercados". *Economía Industrial*, vol. 284, pp. 119-125.
65. (OESA / McKinsey & Co, 1999) OESA / McKinsey & Co. (1999), "Profitable Growth Strategies in the Automotive Supply Industry".
66. (OIT, 2005) Organización Internacional del Trabajo (2005). "Programa de actividades sectoriales tendencias de la industria automotriz que afectan a los proveedores de componentes". ISBN 92-2-316442-7. Ginebra, 2005.
67. (Oliver, 1991) Oliver, N. (1991): "The Dynamics of Just-in-Time". *New Technology, Work and Employment*; vol.6, num.1, pp. 19-27.
68. (Park y Hartley, 2002) Park, Seungwook y Hartley, Janet L. (2002). "Exploring the Effect of Supplier Management on Performance in the Korean Automotive Supply Chain". *The Journal of Supply Chain Management | Spring 2002. May 2002*, by the Institute for Supply Management, Inc.™
69. (Pérez, 2000) Pérez, Carlota (2000). "El cambio tecnológico y las oportunidades de desarrollo como objetivo móvil". Conferencia de las Naciones Unidas Sobre Comercio y Desarrollo. X-UNCTAD, TD(X)/RT.1/9.

70. (Pine, 2002) Pine, B. J. II (1002). "Mass Customization, the New Frontier in Business competition". Harvard Business School Press, Cambridge, M A.
71. (Porter, 2000) Porter, M. E. (2000) "Ventaja competitiva: Creación y sostenimiento de un desempeño superior". Compañía Editorial Continental, 19va. Impresión. México.
72. (PricewaterhouseCoopers, 1999) PricewaterhouseCoopers (1999). "Global Automotive Deal Survey 1998". Página web: <http://www.pwcglobal.com>.
73. (PricewaterhouseCoopers, 2005) PricewaterhouseCoopers (2005). "Automotive Industry Investment and Location Drivers: Focus on Sweden". Price WSatherhouse Coopers. Página web: <http://www.pwcglobal.com/extweb/pwcpublishations.nsf>.
74. (Rainnie, 1991) Rainnie, A. (1991). "Just in Time, Sub-contracting and the Small Firm". Work, employment and Society; vol. 5, num. 3, pp. 353-375.
75. (Rallet, 1993) Rallet, A. (1993) "Choix de proximité et processus d'innovation technologique". Revue d'Économie Régionale et Urbaine n° 3, pp. 365-386.
76. (Rey, 2001) Rey, María (2001). "Supply Chain Collaboration". Latin America Logistics Center, Atlanta, GA USA.
77. (Román, 2004) Román E. Manuel F. (2004). "Programa fundamental para el desarrollo económico del Estado de México hacia el 2005 y de competitividad: Visión 2020". Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey.
78. (Sabrià, *et al*, 2004) Sabrià, F; De Zan, A; Longstaff, J; y Nikolaisen, J. (2004). "Logística del automóvil". Logis Book. IESE-CIIL (Centro Internacional de Investigación Logística).
79. (Sachon y Albiñana, 2004) Sachon, Marc y Albiñana, Daniel (2004). "Sector español del automóvil: ¿preparado para el e-SCM?". e-business Center PricewaterhouseCoopers & IESE.
80. (Sako, *et al*, 1995) Sako, M., Lamming, R.C. y Helper, S.M. (1995). "Supplier Relations in the UK Car Industry: Good News-Bad News". European Journal of Purchasing and Supply Management; vol. 2, num.1.
81. (Santarini, 2006) Santarini, Michel (2006). "Design Challenges Steer Automotive Electronics". Revista electrónica EDN. Página web: http://www.mathworks.com/company/pressroom/press_covrg_pdfs/1.5.06_edn.pdf.
82. (Shingo, 1981) Shingo, S. (1981) "Study of Toyota Production System for Industrial Engineering Viewpoint". Japan Management Association, Tokio.
83. (SMMT, 2002) SMMT (2002) "Survey on the Growth Perspectives of the European Automotive Supplier Industry". SMMT Society of Motor Manufacturers and Traders. Automotive Advisors & Associates.
84. (Treece, 1997) Treece, J. B. (1997). "Just-Too-Much Single-Sourcing Spurs Toyota Purchasing Review: Maker Seeks At Least 2 Suppliers for Each Part". Automotive News, March 3, pp. 3-4.
85. (Turnbull, 1988). Turnbull, P. (1988): "The Limits to Japanisation Just in time: Labour relations and the UK Automotive Industry". New Technology, Work and Employment; vol. 3, num 1, pp. 7-20.
86. (Turnbull, *et al*, 1992) Turnbull, P., Oliver, N. y Wilkinson, B. (1992): "Buyer-Supplier Relations in the UK Automotive Industry: Strategic Implications of the Japanese Manufacturing Model". Strategic Management Journal; vol. 13, num. 2, pp. 159-168.
87. (UNCTAD, 2004). UNCTAD (2004) "UNCTAD Handbook of Statistics, 2004". United Nations Conference on Trade and Development (2004). Página web: <http://www.unctad.org/statistics/handbook>.
88. (Veloso y Kumar, 2002) Veloso, Francisco y Rajiv Kumar (2002). "The Automotive Supply Chain: Global Trends and Asian Perspectivas". ERD Working Paper Series No. 3 Economics and Research Department. Asian Development Bank, January 2002.

89. (Veloso y Soto, 2001) Veloso, F y Soto, M. (2001). "Incentives, Infrastructure and Institutions: Perspectives on Industrialization and Technical Change in Late-Developing Nations". *Technological Forecasting and Social Change*, North Holland; vol. 66, pp. 87-109.
90. (Veloso, *et al*, 2000) Veloso, F., C. Henry, R. Roth, y J. Clark, 2000. "Global Strategies for the Development of the Portuguese Autoparts Industry". Lisboa: IAPMEI.
91. (Womack, *et al*, 1990) Womack, James. P, Jones, Daniel T. y Roos, Daniel (1990). "The Machine that Changed the World". New York: Rawson Associates.

Capítulo 5

Modelos propuestos para la coordinación de inventarios utilizando diversos modos de transporte para el abastecimiento

5.1 Introducción

Una de las corrientes de investigación más importantes en la cadena de suministro es la coordinación entre clientes y proveedores para acordar la cantidad ha ordenar/producir (o, el programa de abasto), así como el precio de compra de los productos (Mishra, 2004). A partir de investigaciones realizadas, se ha concluido que la administración eficiente de la cadena de suministro requiere de un enfoque integrado de los diferentes actores que la componen (Lambert y Gardner, 1996). Como parte de este enfoque, la colaboración es reconocida como una de las nuevas estrategias para lograr ventajas competitivas a través de la coordinación (Dyer y Singh, 1998).

El trabajar muy cercanamente entre proveedores y clientes atendiendo la demanda y la oferta, permite lograr beneficios para toda la cadena en su conjunto (Fisher, 1997). En particular, la reducción de los costes y la mejora de los niveles de servicio se pueden obtener coordinando a los socios comerciales (cliente- proveedor) a través de la definición conjunta de las políticas de inventario y transporte (Tyworth, 1992).

En este capítulo, bajo el esquema de *Épocas Comunes de Resurtido* (ECR) (Viswanathan y Piplani, 2001), considerando un proveedor de n productos, tres modos de transporte (rápido, medio y lento) y un cliente, se propone atender los criterios de coste total en la gestión de inventarios y el nivel de servicio del transporte construyendo un modelo de optimización bicriterio, para determinar simultáneamente los niveles de productos a adquirir y el modo de transporte más adecuado en cada período, cuando la demanda es determinista y dinámica.

El uso de modelos matemáticos para la solución de los diferentes problemas que se presentan en la gestión de la cadena de suministro, se ha convertido en una herramienta muy poderosa en la actualidad. La utilidad práctica del empleo de un modelo puede tener efecto, tanto en el incremento de la productividad como en el

ahorro de costes, o incluso, en la mejora de las decisiones que hay que tomar en el ámbito de la empresa. En términos generales, el diseño específico de algún modelo en particular, intenta ofrecer una perspectiva de un hecho o fenómeno del mundo real, sin embargo, en ninguna caso sustituirá, pero si reforzará, el buen juicio y punto de vista del tomador de decisiones.

En la actualidad, es bien conocido que existe una gran cantidad de artículos que atienden los problemas de la cadena de suministro a través de diferentes perspectivas de modelado. De acuerdo con Ganeshan, *et al.* (1998), dichos estudios se llevan a cabo bajo cuatro metodologías de solución específicas: *i*) modelos no cuantitativos: buscan analizar la cadena de suministro en un intento por definir, describir y desarrollar métodos de gestión sin usar métodos cuantitativos; *ii*) estudios de caso o empíricos: realizan un trabajo de investigación aplicado a empresas o industrias específicas; *iii*) desarrollo de taxonomías o revisión de la literatura: clasifican y definen el marco conceptual de la cadena de suministro; y *iv*) modelos cuantitativos (que incluyen el uso de técnicas de optimización, simulación, modelos estocásticos): buscan desarrollar métodos para evaluar los factores cualitativos y cuantitativos de la gestión de la cadena de suministro utilizando conceptos cuantificables.

Beamon, (1998) a su vez, clasifica los modelos cuantificables en cuatro categorías: *i*) modelos analíticos deterministas, en los cuales las variables son conocidas y especificadas; *ii*) modelos estocásticos, donde al menos una de las variables es desconocida, y se asume una distribución de probabilidad específica; *iii*) modelos económicos; y *iv*) modelos de simulación.

Retomando dicha clasificación, en este capítulo se presenta el desarrollo de dos modelos cuantitativos desde el punto de vista determinista en el contexto de los llamados modelos de optimización multicriterio. En términos generales, en la vida real es rara la actividad en la que el ser humano no tenga que tomar decisiones que atienden múltiples criterios en conflicto, y no sólo uno. En efecto, en la praxis empresarial, raramente se toma una decisión atendiendo exclusivamente a un criterio, sino que se intenta satisfacer a la vez varios objetivos diferentes que normalmente entran en conflicto. Por este motivo, la justificación de utilizar métodos multicriterio para la planificación del abastecimiento de los productos, obedece simplemente a tratar de

cumplir con los diversos objetivos que se plantean las empresas que conforman las cadenas de suministro.

Pues bien, utilizando la metodología diseñada en el capítulo 1, los planteamientos identificados en el marco teórico conceptual (capítulo 2), así como el Estado del Arte (capítulo 3), se han podido determinar las bases científico-metodológicas para desarrollar los modelos que buscan dar solución al planteamiento del problema, pensado en el contexto del sector de la automoción (capítulo 4); de esta manera, destacando la selección de ciertos modelos que de referencia y los fundamentos teóricos para resolver el problema que se plantea (véase figura 5.1).

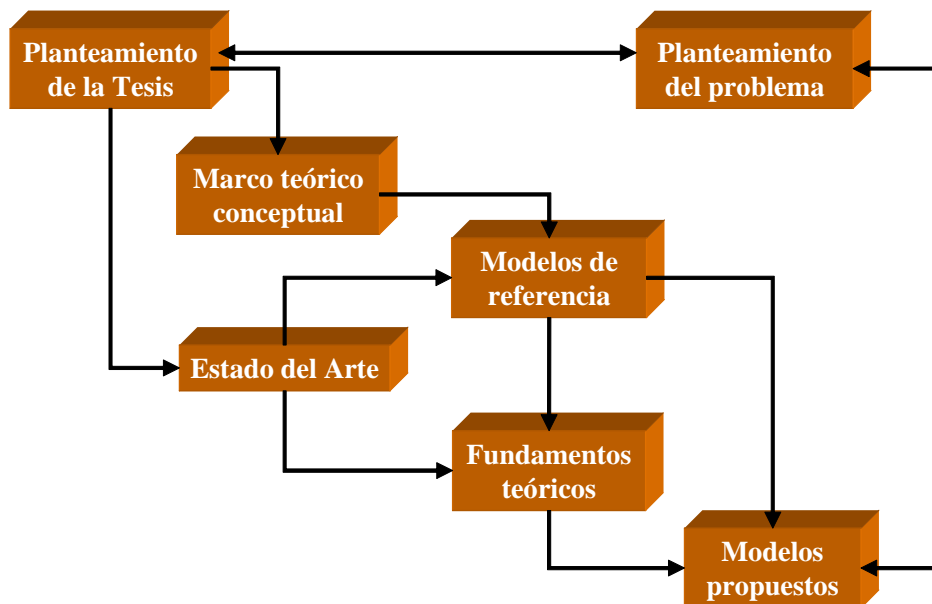


Figura 5.1
Marco metodológico para el desarrollo de la propuesta

De esta manera, el objetivo primordial de este capítulo es presentar el desarrollo de la propuesta para modelar la coordinación de inventarios multiproducto entre un cliente y un proveedor, evaluando de manera explícita la influencia de tres modos de transporte en el ámbito del comercio internacional. Como ya se ha mencionado, los modelos aquí presentados son formulados en el contexto de la programación matemática multicriterio/multiobjetivo, cuya virtud principal es el de poder generar un abanico de soluciones para ayudar a la toma de decisiones.

La estructura de este capítulo por lo tanto, se conforma de seis apartados principales. El primero, es la presente introducción la cual describe la idea principal sobre el desarrollo metodológico adoptado para formular los modelos. El segundo, hace

una descripción detallada de los modelos de referencia, los cuales proporcionan la pauta para el desarrollo matemático de la propuesta. El tercero, rescata los fundamentos teóricos relevantes de los modelos de referencia, los cuales fundamentan el desarrollo de los modelos que se concretan en los apartados cuarto y quinto, a través del planteamiento del problema y la formulación matemática. El último apartado, presenta las conclusiones sobre la estructura y planteamiento de los modelos propuestos.

5.2 Modelos de referencia para la coordinación de inventarios

En cierta forma, el objetivo de los modelos que tratan el tema de la coordinación de los inventarios es el establecimiento de un programa de las cantidades de abastecimiento que satisfaga la demanda de los clientes a un coste mínimo; sin embargo, en el fondo también se busca diseñar un sistema eficiente descentralizado que corresponda al nivel de interdependencia empresarial que exigen las cadenas de suministro modernas. Los modelos que tratan el tema de la coordinación de inventarios, presentados en el capítulo 3, parece que así lo manifiestan.

En general, este tipo de modelos, que podrían localizarse también en el contexto de los problemas de distribución y abasto, pueden llegar a ser tan complejos como aquellos que consideran el proceso de producción entero (suministro de materias primas, proceso de fabricación y entrega de productos terminados), debido a las diferentes condiciones que toman lugar (por ejemplo: demanda, estática o variable, determinista o estocástica; período de programación, finito o infinito; restricciones, capacidad limitada de producción o almacenaje); pero sobre todo, por la incorporación los factores cuantitativos y cualitativos del servicio de transporte a nivel local o internacional, etc.

Por este motivo, en la revisión presentada en el capítulo 3 sobre los modelos para la gestión coordinada del sistema de inventarios, se ha dedicado una atención especial ha aquellos artículos que involucran aspectos relacionados con las variables fundamentales del transporte. Esto último ha permitido detectar que aun existen algunos “*huecos*” o temáticas que no han sido explorados en la literatura científica.

Tratando de explotar esta situación, se considera que el modelado de la coordinación de inventarios, involucrando de manera explícita al transporte en el

proceso de abasto, es una oportunidad manifiesta a la luz de los artículos revisados. En este sentido, a continuación se describen de manera más detallada los trabajos de Viswanathan y Piplani (2001), Chang y Tsai (2002), y Reyes y Gaytán (2003), que presentan modelos relevantes sobre el tema de la coordinación en el contexto que se persigue, y que por lo tanto forman parte de la base teórica para formular los modelos propuestos en esta tesis.

5.2.1 Modelo de Viswanathan y Piplani (2001)

Viswanathan y Piplani (2001) proponen una estrategia de coordinación de inventarios por medio del uso de la estrategia “*Épocas Comunes de Resurtido*” (*ECR*), también conocida como “períodos de tiempo”. El análisis lo llevan a dos eslabones en la cadena considerando un proveedor que suministro un producto a varios clientes.

Como ya fue mencionado (sección 2.2.7.9, capítulo 2), la estrategia consiste en que el proveedor controle el inventario del cliente y establezca las cantidades y fechas de entrega. Debido a que este control puede provocar al cliente un coste adicional por aumento en su nivel de inventario en ciertos períodos, el proveedor plantea una oferta de descuento al cliente sobre el precio de adquisición para alentarlos a aceptar la estrategia *ECR*, y solventar los costes extras que le provoque dicho sobre inventario. Ciertamente, esta práctica reduce la flexibilidad del cliente, y por lo tanto se ve forzado a verificar que el descuento efectivamente compense dicho incremento en sus costes.

Viswanathan y Piplani (2001) modelan la estrategia entorno a la teoría de juego de Stackelberg, en donde el proveedor actúa como líder del juego y los clientes como seguidores. De esta manera, el proveedor toma la iniciativa y establece un descuento Z_i en el precio del producto, y propone el período de surtimiento T_0 y el intervalo de tiempo t_i^C para cada cliente i . El seguidor, en este caso los clientes, actúan de acuerdo con la iniciativa del proveedor y toman su propia decisión revisando su política de inventario, aceptando o no el descuento y la estrategia “*Épocas Comunes de Resurtido*”.

Los autores suponen que los parámetros de coste y demanda de los clientes son conocidos plenamente por el proveedor, con lo cual puede tomar una decisión óptima y anticipar la reacción de los clientes. Consideran determinista y estable (estática) la demanda (D).

En términos generales, el planteamiento del modelo parte de un entorno con políticas de inventario independientes; es decir, cada uno de los actores logísticos tomará decisiones individuales. De esta manera, la estrategia de un cliente i que se basa en lanzar órdenes en un intervalo de tiempo t_i^U , correspondiente a su lote económico (EOQ), está determinado por:

$$t_i^U = \sqrt{(2D_i k_i) / h_i} / D_i = \sqrt{k_i / I_i} \quad (5a.1)$$

Donde: D_i representa la demanda anual, k_i el coste por ordenar y h_i el coste de almacenamiento para el cliente i , para $i = 1, \dots, m$. De la ecuación anterior, se deduce que: $I_i = (1/2)D_i h_i$, representa el nivel de inventario del cliente i .

Por lo tanto, las órdenes de resurtido pueden llegar en cada momento y tienen que ser atendidas inmediatamente. Evidentemente, esta política minimiza el coste total (g_i^U) del cliente por mantener un nivel de inventario (I_i), y por generar órdenes de compra (k_i) cada intervalo de tiempo (t_i^U), es decir:

$$g_i^U = (k_i / t_i^U) + I_i t_i^U = 2\sqrt{k_i I_i} \quad (5a.2)$$

Por su parte, el proveedor dispone de un proceso de gestión para atender las órdenes de sus clientes, lo cual le representa un coste fijo (A_s) por atender un conjunto de éstas, y otro coste fijo (A_i) por atender la orden de cada cliente. De hecho, el proveedor podría incurrir incluso en un coste ($A_s + A_i$) para cada intervalo. Para un conjunto de clientes, el proveedor incurre en un coste total (g_o^U) por intervalo, calculado por:

$$g_o^U = (A_s + \sum_i^m A_i) / t_i^C \quad (5a.3)$$

Por la ausencia de coordinación, el proveedor no puede planear sus entregas y en cualquier momento recibir pedidos. Viswanathan y Piplani (2001) suponen que el proveedor compra producto a un vendedor externo, bajo una demanda de lote por lote.

Bajo este supuesto, el proveedor no guarda inventario alguno y ordena la cantidad requerida cuando recibe una orden de algún cliente.

Bajo un entorno coordinado, el proveedor establece los intervalos (t_i^C) de generación de órdenes para cada cliente (i), el cual se asume que sea un entero múltiple (n_i) del período (T_0), es decir:

$$t_i^C = n_i T_0 \quad n_i \geq 1, \text{ entero.} \quad (5a.4)$$

Por lo tanto, el coste mínimo del inventario del cliente que acepta la estrategia *ECR* será:

$$g_i^C = (k_i/n_i T_0) + I_i n_i T_0 \quad (5a.5)$$

donde (g_i^C) es convexo con respecto a (n_i). Para un (T_0) dado, (g_i^C) es minimizado dando (n_i) como el valor (n_i^*) que satisface:

$$n_i(n_i^* - 1) \leq k_i / (I_i T_0^2) \leq n_i^*(n_i^* + 1) \quad (5a.6)$$

La expresión (5a.6) se obtiene de usar el resultado que $g_i^C(n_i^*)$ no es más grande que cada $g_i^C(n_i^* - 1)$ ó $g_i^C(n_i^* + 1)$.

Como se indicó en un principio, el cliente aceptará la estrategia *ECR* sólo si el descuento ofrecido es lo suficientemente grande que compense el incremento en los costes de inventario, y mejor aún si proporciona algún ahorro de $S\%$ sobre el coste inicial. Por lo tanto, el descuento total ($D_i Z$) debe satisfacer la siguiente condición:

$$D_i Z \geq (k_i/n_i T_0) + I_i n_i T_0 - (1 - S) 2\sqrt{k_i I_i} \quad (5a.7)$$

Es decir, el descuento total debe ser mayor o igual a los costes por ordenar y por mantener inventario, menos el ahorro potencial del coste incurrido sin coordinación.

Para el proveedor, el coste relevante bajo la estrategia *ECR* está compuesto por los costes por procesar las órdenes más el coste del precio del descuento, es decir:

$$g_o^c = A_s/T_0 + \sum_{i=1}^m \left(D_i Z + \left(A_i / n_i T_0 \right) \right) \quad (5a.8)$$

Por lo anterior, para determinar (T_0) y (Z) para el proveedor, el modelo es formulado como:

$$(P) \text{ Minimizar } g_o^c = A_s/T_0 + \sum_{i=1}^m \left(D_i Z + \left(A_i / n_i T_0 \right) \right) \quad (5a.9)$$

$$\text{Sujeto a: } D_i Z \geq (k_i / n_i T_0) + I_i n_i T_0 - (1 - S) 2\sqrt{k_i I_i} \quad \forall i = 1, \dots, m \quad (5a.10)$$

$$T_0 \in X \quad (5a.11)$$

$$n_i \geq 1 \text{ y entero } \forall i = 1, \dots, m \quad (5a.12)$$

$$X \text{ es el conjunto de } ECR \text{ 's consideradas} \quad (5a.13)$$

Para el caso cuando el descuento en el precio del producto fuese diferente, establecen que:

$$D_i Z = (k_i / n_i T_0) + I_i n_i T_0 - (1 - S) 2\sqrt{k_i I_i} \quad (5a.14)$$

Debido a que el último término de (5a.14) es una constante para un problema dado, el problema del proveedor (P1) se modifica de la siguiente manera:

$$(P1) \text{ Minimizar } g_o^c = A_s/T_0 + \sum_{i=1}^m \left(((k_i + A_i) / n_i T_0) + I_i n_i T_0 \right) \quad (5a.15)$$

$$\text{Sujeto a: } T_0 \in X \quad (5a.16)$$

$$n_i \geq 1 \text{ y entero } i = 1, \dots, m \quad (5a.17)$$

El problema (P1) es una versión especial del bien conocido problema de resurtido conjunto (*JRP*, por sus siglas en inglés) con una restricción adicional (5a.16). Los autores de este modelo, reportan que Goyal (1974) y Viswanathan (1996) formulan algoritmos óptimos para resolver este problema.

Por lo que respecta a los problemas (P) y (P1) señalan que la función objetivo de ambos necesitan no ser convexas con respecto a los elementos de (X) , y que el (T_0) óptimo es determinado por medio de la evaluación de de las funciones objetivos (5a.9) y

(5a.15) a través de una exhaustiva búsqueda para todos los valores de $x_j \in X$. Para un particular valor de $T_0 = x_j$, el (n_i) óptimo para cada cliente i puede ser determinado por (5a.6) para el problema (P) y (5a.18) para el problema P1.

$$n_i(n^* - 1) \leq (k_i + A_i)/(I_i T_0^2) \leq n^*(n^* + 1) \quad (5a.18)$$

5.2.2 Modelo de Chang y Tsai (2002)

Chang y Tsai (2002) desarrollaron un modelo (siguiendo a Viswanathan y Piplani, 2001), con el cual buscan determinar la cantidad óptima ha ordenar y los mejores períodos de abasto, que minimicen los costes totales del proveedor por el procesamiento de órdenes y de transporte, sujeto a maximizar los costes con los cuales los clientes estarían dispuestos ha incurrir. Afirman que en situaciones reales, es muy común que el proveedor persiga entregas por lotes de producción completos o grandes para los clientes, circunstancia modelada por estos autores.

Por lo anterior, Chang y Tsai (2002) señalan que los costes totales (TC_i) del cliente no sólo están conformados por los costes por ordenar (k_i) y de mantención de inventario (h_i), sino también por los costes del procesamiento de sus productos (R_i , recibo), es decir:

$$TC_i = k_i \frac{D_i}{Q_i} + h_i \frac{Q_i}{2} + R_i \frac{D_i}{Q_i} \quad (5a.19)$$

Minimizando el coste total y obteniendo $I_i = (1/2)D_i h_i$, la cantidad económica ha ordenar (Q_i^*) y el período de abasto (T_i) para el cliente (i), pueden ser expresados por las ecuaciones (5a.20) y (5a.21):

$$Q_i^* = \sqrt{\frac{2D_i(k_i + R_i)}{h_i}} \quad (5a.20)$$

$$T_i = \frac{Q_i}{D_i} = \sqrt{\frac{(k_i + R_i)}{I_i}} \quad (5a.21)$$

Por lo tanto, considerando que cada cliente toma sus propias decisiones, el coste total de inventario (G_{i0}^b) para el cliente (i) se simplifica como:

$$G_{i0}^b = \frac{(k_i + R_i)}{T_i} + I_i T_i = 2\sqrt{I_i(k_i + R_i)} \quad (5a.22)$$

Cuando el proveedor acepta los pedidos de los clientes, se incurre en los costes de procesamiento de pedidos y de transporte para la entrega. Dichos costes para el cliente i son ($A_s + A_i + C_i$). Para satisfacer la demanda de los clientes, el coste total G_0^v para procesar órdenes y entregas se expresa de la siguiente manera:

$$G_0^v = \sum_{i=1}^n \frac{(A_s + A_i + C_i)}{T_i} \quad (5a.23)$$

Bajo el mismo contexto de la estrategia *ECR*, el proveedor conoce el descuento mínimo (Z_i) que puede ser aceptable por los clientes; establece las épocas comunes de resurtido (T_0) y determina la tasa de compensación $S\%$ que ofrece a los clientes.

Sin embargo, Chang y Tsai (2002) agregan que el proveedor adoptará entregas por lotes completos o grandes, para reducir los costes de mantenimiento de inventarios y aumentar la flexibilidad de su planta para cambiar las especificaciones de producción.

Después de alcanzar acuerdos entre el proveedor y los clientes y en el contexto de la estrategia *ECR*, el periodo de lanzar una orden (T_i') o de abastecimiento (T_i''), así como los costes totales (G_{ic}^b) del cliente i antes del descuento, son expresados por las ecuaciones (5a.24) y (5a.25), respectivamente.

$$T_i' = N_i T_0 \text{ ó } T_i'' = n_i T_0, \text{ donde } N_i, n_i \geq 1 \quad (5a.24)$$

$$G_{ic}^b = \frac{k_i}{N_i T_0} + h_i \frac{D_i(n_i T_0)}{2} + \frac{R_i}{n_i T_0} = \frac{k_i}{x_i n_i T_0} + I_i n_i T_0 + \frac{R_i}{n_i T_0} \quad (5a.25)$$

El proveedor propone un período fijo de abasto y llega a un acuerdo con los clientes sobre el descuento en el precio del producto, el cual se expresa como:

$$Z_i = \frac{1}{D_i} \left\{ \frac{k_i}{x_i n_i T_o} + I_i n_i T_0 + \frac{R_i}{n_i T_0} - 2(1-S)\sqrt{I_i(k_i + R_i)} \right\} \quad (5a.26)$$

Sea el precio final de descuento $Z = \text{Max}\{Z_i\}$. Si el precio total de descuento es más alto que el incremento en los costes de inventario, los clientes aceptaran la estrategia ECR. En este caso, el precio total de descuento ($D_i Z$) ganado por el cliente, debe satisfacer la siguiente desigualdad:

$$D_i Z \geq \frac{k_i}{x_i n_i T_o} + I_i n_i T_0 + \frac{R_i}{n_i T_0} - 2(1-S)\sqrt{I_i(k_i + R_i)} \quad (5a.27)$$

Bajo una política de coordinación, el coste total (G_c^v) incurrido por los proveedores, debido al procesamiento de órdenes y entregas, se expresa como:

$$G_c^v = \frac{A_s}{T_0} + \sum_i \left(D_i Z + \frac{A_i}{N_i T_0} + \frac{C_i}{n_i T_0} \right) \quad (5a.28)$$

Por su parte, los costes totales incurridos por los clientes, por concepto de inventarios, son expresados de la siguiente manera:

$$G_{ic}^b = \frac{k_i}{x_i n_i T_o} + I_i n_i T_0 + \frac{R_i}{n_i T_0} - D_{iz} \quad (5a.29)$$

En esta investigación, Chang y Tsai (2002) buscan minimizar los costes totales del proveedor por procesar ordenes y realizar las entregas, obtener al período óptimo de abastecimiento, el descuento en el precio de su producto, así como el período en que el cliente debe ordenar y abastecerse. Todas las ecuaciones derivadas del desarrollo anterior, y que calculan dicho objetivos, se resumen en el siguiente problema:

$$\text{Min} \quad G_c^v = \frac{A_s}{T_0} + \sum_i \left(D_i Z + \frac{A_i}{N_i T_0} + \frac{C_i}{n_i T_0} \right) \quad (5a.30)$$

$$\text{Sujeto a:} \quad D_i Z \geq \frac{k_i}{x_i n_i T_o} + I_i n_i T_0 + \frac{R_i}{n_i T_0} - 2(1-S)\sqrt{I_i(k_i + R_i)} \quad (5a.31)$$

$$n_i(n_i + 1) \geq \frac{k_i + x_i R_i}{x_i I_i T_0^2} \geq n_i(n_i - 1) \quad (5a.32)$$

$$N_i, n_i \geq 1, \text{ donde ambos son enteros positivos} \quad (5a.33)$$

$$T_0 \in X, X = \left\{ \frac{1}{365}, \frac{a}{52} \right\}; \text{ en donde } a \text{ es un entero positivo} \quad (5a.34)$$

5.2.3 Modelo de Reyes y Gaytán (2003)

Reyes y Gaytán (2003) desarrollan un modelo para la coordinación de inventarios también en el contexto de la estrategia de *Épocas Comunes de Resurtido (ECR)*. El objetivo de dicho modelo busca establecer la coordinación entre dos entidades de la cadena de suministro para generar ahorros, incrementar la rentabilidad y generar valor en los eslabones involucrados.

A diferencia de los modelos de Viswanathan y Piplani (2001) y Chang y Tsai (2002), Reyes y Gaytán (2003) proponen cambios sustanciales en la condiciones del modelo. Por ejemplo, la demanda es considerada determinista pero variable a lo largo de un horizonte finito de planeación. En el contexto de la estrategia *ECR*, el proveedor ofrece un descuento al cliente para compensar los incrementos en sus niveles de inventarios, pero ahora sobre el coste de su política óptima para cada producto.

Establecen que el sistema de abastecimiento está compuesto por un proveedor que suministra una familia de productos a un cliente utilizando de manera explícita dos modos de transporte (uno lento y otro rápido). El precio de venta es el mismo para cada producto.

Las variables de decisión consideradas por dichos autores son: la cantidad ordenada de cada producto transportada por los modos lento y rápido, y el descuento proporcionado al cliente por aceptar la estrategia *ECR*. Y como variable de control, el nivel de inventario final.

Utilizando la estrategia *ECR* el proveedor conoce los costes y parámetros de la demanda de los diferentes productos del cliente, por lo que puede anticipar su reacción y tomar una decisión óptima acerca de las cantidades a enviar y de los modos de transporte que utilizará para mover los productos, de tal manera que minimice sus costes y los del cliente que incluyen: costes por ordenar, almacenar y transporte de los productos, así como los costes totales del sistema (cliente-proveedor).

La notación utilizada en la formulación del modelo es la siguiente:

g_n^i = Coste total del cliente sin política *ECR*

$I_{i,t}$ = Inventario final en el período t del producto i

k_i = Coste fijo para el cliente por generar una orden del producto i

C_i^1 = Coste por transportar una unidad por el modo de transporte rápido (\$/unidad)

C_i^2 = Coste por transportar una unidad por el modo de transporte lento (\$/unidad)

$Q_{i,t}^1$ = Cantidad del producto i transportado por el modo rápido (unidades/período) en el período t

$Q_{i,t}^2$ = Cantidad del producto i transportado por el modo lento (unidades/período) en el período t

h_B = Coste por mantener un artículo en el inventario del cliente durante un período, una unidad de \$ del artículo, dado en \$/(unidad-período), en el almacén del cliente

H_R = Coste por mantener un artículo en inventario mientras es transportado por el modo rápido, dado en \$/(unidad-período)

H_L = Coste por mantener un artículo en inventario mientras es transportado por el modo lento, dado en \$/(unidad-período)

Teniendo en cuenta los supuestos propuestos y bajo una política sin coordinación, Reyes y Gaytán (2003) primeramente definen el coste del proveedor sin estrategia *ECR*, el cual, esta compuesto por un coste fijo A_S por procesar un conjunto de órdenes (siempre y cuando el cliente haya pedido uno o más productos), más un coste fijo A_i por procesar cada orden del cliente de cada producto $i = 1, \dots, n$, es decir:

$$g_0^n = \sum_{t=1}^T A_S y_t + \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T A_i r_{i,t} \quad (5a.35)$$

Donde: y_t y $r_{i,t}$ son variables binarias $\{0, 1\}$

Posteriormente, determinan el coste del cliente sin la estrategia *ECR*. Los supuestos establecen que el cliente experimenta una demanda determinista y dinámica para cada uno de los productos de la familia durante un horizonte finito de T períodos. Incurrir en costes por mantener inventario de cada producto y por generar una orden de compra. Los tiempos de entrega de cada uno de los modos de transporte son conocidos y múltiplos de mes. No se permiten faltantes, el inventario al inicio y al final del horizonte de planeación es cero. Sin estrategia *ECR*, cada cliente lanza órdenes en los

períodos y en las cantidades de acuerdo a su política óptima, con la ayuda de algún método exacto, como el de Wagner y Whitin (1958).

El coste por mantener los productos en inventario es el mismo para todos, solamente difiere por el lugar donde se encuentre; si es el almacén del cliente, o si es en cualquiera de los modos de transporte durante su traslado (temporal). El coste por concepto de transporte es el mismo para todos los productos, y difiere para cada uno de los modos (lento o rápido).

A partir de estas consideraciones, Reyes y Gaytán (2003) formulan el siguiente modelo que determina los costes totales g_i^n en los que incurre el cliente en el contexto no coordinado:

$$\text{Min } g_i^n = \sum_{t=1}^T k_i r_{i,t} + \sum_{T=1}^T C_i^1 Q_{i,t}^1 + \sum_{T=1}^T C_i^2 Q_{i,t}^2 + \sum_{T=1}^T h_B I_{i,t} + \sum_{T=1}^T H_R Q_{i,t}^1 + \sum_{T=1}^T H_L Q_{i,t}^2 \quad (5a.36)$$

Sujeto a las siguientes restricciones:

$$I_{i,t} = I_{i,t-1} + Q_{i,t}^1 + Q_{i,t}^2 - D_{i,t} \quad \forall i = 1, \dots, n; \quad t = 1, \dots, T \quad (5a.37)$$

$$Q_{i,t}^1 + Q_{i,t}^2 \leq N_i r_{i,t} \text{ con } N_i = \sum_{t=1}^T D_{i,t} \quad \forall i = 1, \dots, n; \quad t = 1, \dots, T \quad (5a.38)$$

$$\frac{Q_{i,t}^1}{Q_{i,t}^1 + Q_{i,t}^2} = p \quad \text{con } 0 < p < 1, \quad \forall i = 1, \dots, n; \quad t = 1, \dots, T \quad (5a.39)$$

$$I_{i,0}, I_{i,T} = 0 \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (5a.40)$$

$$I_{i,t}, Q_{i,t}^1, Q_{i,t}^2 \geq 0 \quad \forall i = 1, \dots, n; \quad t = 1, \dots, T \quad (5a.41)$$

$$r_{i,t} \in \{0,1\} \quad \forall i = 1, \dots, n; \quad t = 1, \dots, T \quad (5a.42)$$

Un modelo equivalente al anterior, más fácil de resolver, se obtiene haciendo $Q_{i,t}^1 = p q_{i,t}$ y $Q_{i,t}^2 = (1-p) q_{i,t}$; p y $q_{i,t}$, representan la proporción de carga que el tomador de decisiones determina enviar por cada modo, quedando el modelo de la siguiente manera:

$$\text{Min } g_i^n = \sum_{t=1}^T k_i r_{i,t} + \sum_{T=1}^T (q_{i,t} (p(C^1 + H_R)(1-p)(C^2 + H_L))) + \sum_{t=1}^T h_B I_{i,t} \quad (5a.43)$$

$$\text{Sujeto a: } I_{i,t} = I_{i,t-1} + q_{i,t} - D_{i,t} \quad \forall i = 1, \dots, n; \quad t = 1, \dots, T \quad (5a.44)$$

$$q_{i,t} \leq N_i r_{i,t} \text{ con } N_i = \sum_{t=1}^T D_{i,t} \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (5a.45)$$

$$I_{i,0}, I_{i,T} = 0 \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (5a.46)$$

$$I_{i,t}, Q_{i,t}^1, Q_{i,t}^2 \geq 0 \quad \forall i = 1, \dots, n; \quad t = 1, \dots, T \quad (5a.47)$$

$$r_{i,t} \in \{0, 1\} \quad \forall i = 1, \dots, n; \quad t = 1, \dots, T \quad (5a.48)$$

La restricción (5a.44), balance de inventarios, explica que la cantidad de inventario al final del período actual ($I_{i,t}$) es igual al inventario final del período inmediato anterior ($I_{i,t-1}$), más la cantidad pedida por el proveedor en el período actual ($Q_{i,t}^1 + Q_{i,t}^2$), menos la demanda experimentada por el cliente ($D_{i,t}$). La siguiente restricción (5a.45) asegura que el cliente incurrirá en el coste individual de cada artículo por ordenarlo, siempre y cuando pida el producto al proveedor ($r_{i,t}$). La restricción (5a.46) establece que el inventario de cada cliente será cero al inicio y al final del horizonte de planeación. Las restricciones (5a.47) y (5a.48), definen el tipo de variables usadas en el modelo y sus posibles valores.

El modelo coordinado con estrategia ECR

Con la estrategia *ECR* adoptada, el proveedor incurre en un coste fijo A_s por procesar un conjunto de órdenes del cliente, más un coste fijo individual A_i por incluir el producto i en la orden, más el descuento que hace al cliente para compensar el aumento en sus costes por incrementar su nivel de inventario al aceptar la política de coordinación *ECR*. Conoce la demanda de cada producto del cliente y sus costes por ordenar y mantener inventario; por lo tanto, puede determinar para un tiempo base T_0 en particular, los períodos en los cuales cada cliente debe ordenar para minimizar sus costes. Como consecuencia, tiene la posibilidad de determinar el descuento mínimo sobre el precio de los productos, para que el cliente acepte usar la política *ECR*. Deberá dar al cliente un descuento Z_i para cada producto i sobre el precio de cada uno, para compensar el incremento de los costes de producto i por usar la política *ECR*, y además proveer un ahorro $S\%$ sobre el coste total si no usará la coordinación *ECR*. Deberá

determinar las cantidades a enviar en cada modo de transporte, de tal manera que sus costes sean mínimos.

Por lo anterior, el modelo de optimización lineal entero a continuación, determina el coste total g_0^c para el proveedor usando la estrategia *ECR*, durante el horizonte finito de T periodos, del cual se deriva también el coste total g_i^c de cada producto i al usar la coordinación.

$$\text{Min } g_0^c = \sum_{t=1}^T A_S y_t + \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T A_i r_{i,t} + \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T D_{i,t} v Z_i \quad (5a.49)$$

Sujeto a:

$$\sum_{t=1}^T D_{i,t} v Z_i = \left[\left(\sum_{t=1}^T k_i r_{i,t} + \sum_{t=1}^T (q_{i,t} (p(C^1 + H_R)(1-p)(C^2 + H_L))) + \sum_{t=1}^T h_B I_{i,t} \right) - g_i^n (1-S) \right] \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (5a.50)$$

$$I_{i,t} = I_{i,t-1} + q_{i,t} - D_{i,t} \quad \forall i = 1, \dots, n; \quad t = 1, \dots, T \quad (5a.51)$$

$$I_{i,0}, I_{i,T_0} = 0 \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (5a.52)$$

$$q_{i,t} \leq N_i r_{i,t} \text{ con } N_i = \sum_{t=1}^T D_{i,t} \quad \forall i = 1, \dots, n; \quad t = 1, \dots, T \quad (5a.53)$$

$$r_{i,t} = 0 \quad \forall i = 1, \dots, n; \quad t \neq \Omega_0 \quad (5a.54)$$

$$\text{siendo } \alpha = \left\lfloor \frac{T-1}{T_0} \right\rfloor$$

$$\sum_{t=1}^T r_{i,t} \leq M_1 y_t \quad \text{con } M_1 = n; \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (5a.55)$$

$$r_{i,t}, y_t \in \{0,1\} \quad \forall i = 1, \dots, n; \quad t = 1, \dots, T \quad (5a.56)$$

$$Z_i \geq 0 \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (5a.57)$$

$$I_{i,t}, q_{i,t} \geq 0, \text{ entero} \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (5a.58)$$

$$T_0 \in \Omega_0 \quad \text{donde } \Omega_0 = \{x/2 \leq x \leq T, \text{entero}\} \quad (5a.59)$$

$$Q_{i,t}^1 + Q_{i,t}^2 = \frac{Q_{i,t}^1}{p} \quad \forall i = 1, \dots, n; \quad t = 1, \dots, T \quad (5a.60)$$

De este modelo, destaca que la restricción (5a.50) garantiza el descuento (Z_i), aplicado a cada uno de los productos; compensa con un ahorro del $S\%$ sobre el coste de

no usar una estrategia *ECR*, debido al incremento por tener más inventario y/o generar más órdenes de compra al no pedir con base en su política óptima individual.

El análisis numérico del modelo se lleva a cabo con base en los ahorros obtenidos por el proveedor quién vende una familia de productos ($n = 10$), y un cliente quien los compra, a través de un horizonte de planeación finito de 12 períodos ($T = 12$).

El número de escenarios o problemas diferentes que se configuran para ser analizados, es de 64; correspondientes al número de combinaciones posibles surgidas de variar en cuatro valores diferentes los siguientes parámetros del modelo *ECR*: A_s = coste fijo para el proveedor por procesar un conjunto de ordenes; A_i = coste fijo para el proveedor por procesar cada orden en particular de cada producto i ; $D_{i,t}$ = demanda del producto i en el período t . Los costes de mantener inventario se dejaron fijos, tanto en el inventario del cliente como en el inventario en tránsito de cada uno de los modos, así como los costes de transporte.

Dentro de los hallazgos más relevantes, encontraron que de los 64 escenarios que analizaron, en 48 (75% de los casos) se produjeron ahorros tanto para el proveedor como para el sistema. Es importante recordar, que en estado coordinado el ahorro para el cliente es de 10%. En dichos términos, se establece que la estrategia *ECR* funciona para una demanda dinámica en el tiempo, pero también se podría interpretar este resultado indica que no en todos los casos es aplicable dicha estrategia.

A partir de los resultados obtenidos del experimento predescrito, Reyes y Gaytán (2003) señalan que independientemente del tipo de escenario, a medida que aumenta el coste A_i , el ahorro para el proveedor incrementa, pero cuando el coste de A_s aumenta, el ahorro para el proveedor se reduce, a pesar de la diferencia en la magnitud del ahorro no es significativa.

Afirman que en los escenarios donde la demanda presenta la menor variabilidad, el ahorro tiende a estabilizarse a medida que el coste menor de A_i se hace más pequeño, mientras que en los escenarios de demanda altamente variable, el ahorro tiene una clara tendencia decreciente a medida de que A_i se hace más pequeño. De manera más específica, determinaron que entre los diferentes factores que variaron en sus

experimentos, encontraron que el tipo demanda y su variabilidad está directamente relacionada con la magnitud de los ahorros obtenidos.

5.2.4 Sinopsis de los modelos analizados

El estudio y revisión de los tres modelos descritos en la sección anterior, permite identificar una serie de elementos sobre los cuales es factible su extensión. La operatividad de dichos modelos se encuentra circunscrita al contexto de la estrategia “*Épocas Comunes de Resurtido*” (*ECR*), donde el cliente acepta la propuesta de lanzar órdenes en tiempos equidistantes a cambio de un descuento en el precio de los productos.

En caso de que algunos clientes emplean este tipo de prácticas y se están abasteciendo en periodos fijos, evidentemente aceptarán la estrategia sin mayor problema dado la ventaja del descuento. Si fuese lo contrario, y estuviesen lanzando sus órdenes en cualquier momento (más conveniente para ellos), es posible que se resistan a aceptar la estrategia *ECR*. En todo caso, puede existir algún otro proveedor que sea más flexible sobre los períodos de entrega o abasto, y poner en riesgo la preferencia del cliente; sin embargo, los clientes tendrían en cuenta una posible adecuación de la compensación de sus incentivos, tales como un descuento en el precio de sus insumos.

El uso de este sencillo y elegante mecanismo de coordinación fue propuesto por Viswanathan y Piplani (2001), con la intención de consolidar órdenes de surtido de diversos clientes y economizar los costes de su procesamiento y abasto, tanto para el cliente como para el proveedor. En términos generales, el trabajo planteado por estos autores, muestra cómo un proveedor puede instrumentar la estrategia *ECR* a partir de calcular el descuento en el precio del producto y de establecer el período óptimo de abastecimiento. El objetivo final de su modelo busca minimizar los costes totales individuales, así como los del sistema en su conjunto (cliente- proveedor).

Con la finalidad de conocer el nivel de simplificación del problema y los límites de la operatividad del modelo, a continuación se presentan los supuestos considerados en los modelos de referencia: no sin antes reconocer que la definición de los supuestos merecen una especial atención, ya que es una de las fases más importante del proceso de

formulación de los modelos analíticos porque revelan las características que los distinguen.

Para el caso del modelo de Viswanathan y Piplani (2001) se establecen los siguientes supuestos:

1. Simulan una estructura de dos eslabones en la cadena de suministro, compuesta por un proveedor que abastece un producto a varios clientes.
2. Consideran que todos los clientes participan en el esquema de coordinación.
3. Asumen que la demanda se comporta de manera estable (constante) y determinista (conocida).
4. Para que funcione la estrategia ECR, el proveedor debe conocer los parámetros de coste del cliente para anticipar las predicciones de venta y establecer el descuento que ofrecerá.
5. Los clientes deben ordenar en múltiplos de tiempo especificados por el proveedor.
6. Señalan que el coste del proveedor por procesar órdenes está compuesto por el coste de atender el conjunto de órdenes de los clientes, más la suma de los costes por procesar (*set up*) cada una de las órdenes específicas de los clientes en el contexto no coordinado.
7. Conviene que el descuento del precio del producto, será idéntico para cada uno de los clientes.
8. Uno de los supuestos más fuertes que establecen estos autores es el hecho de que el proveedor sigue una política de “*lote por lote*” en su sistema de suministro, es decir, se abastece de insumos por medio de su proveedor, sí y sólo sí, recibe una orden del cliente, esto con la finalidad de evitar incurrir en costes por mantenimiento de inventarios. Sus argumentos se basan en que esto simplifica el problema (limita el alcance), les permite demostrar los beneficios de la estrategia ECR y sobre todo, que este supuesto toma sentido cuando se instrumenta dicha estrategia.

Para demostrar los beneficios de la estrategia *ECR*, Viswanathan y Piplani (2001) aplicaron el modelo a 10 clientes, estableciendo un umbral del 10% de ahorro, encontrando los siguientes resultados más importantes:

- a) Los ahorros para el proveedor son negativos para bajos valores de costes por procesar órdenes. Señalan que la coordinación de abasto por medio de *ECR* es sensible cuando dichos costes son más grandes que el valor del umbral dado.
- b) Para altos valores de costes por procesamiento de órdenes, los ahorros del proveedor fueron del 27% y 35% para el sistema, respectivamente.
- c) Cuando los costes por procesar órdenes A_i de un cliente específico son altos, los costes comunes de procesamiento A_s no influyen en el porcentaje de los ahorrados en costes del proveedor o el sistema.
- d) Los ahorros del proveedor como del sistema, tienden a incrementarse con la estrategia *ECR* cuando los costes de procesamiento A_s y A_i son grandes.

Por su parte Chang y Tsai (2002) extienden el trabajo de Viswanathan y Piplani (2001) y presentan un desarrollo muy similar al de estos autores, con algunas pequeñas diferencias pero relevantes por los resultados alcanzados. Ambos modelos son desarrollados con base en el modelo EOQ, motivo por el cual consideran a la demanda como estacionaria.

De entrada, las dos diferencias más importantes que consideran Chang y Tsai (2002) son las siguientes:

- a) El coste total del cliente no sólo está conformado por los costes por ordenar y de manutención de inventario, sino también por los costes del procesamiento del abasto (recibo de los productos).
- b) A los costes del proveedor por atender el conjunto de órdenes y por procesar cada orden (*set up*), se agrega el coste de entrega de los productos al cliente (transporte de los productos).

Por lo que respecta a los supuestos que consideran prácticamente son los mismos con algunas variantes, tales como:

1. Asumen que el proveedor buscará lanzar completo su lote de producción en la orden del cliente.
2. A diferencia de Viswanathan y Piplani (2001), en este caso si se indica que no se permite escasez o faltantes.
3. Debido a que consideran los costes por procesar el recibo de las órdenes (cliente) y el proceso de envío (proveedor), establecen que los períodos de suministro del proveedor, deben satisfacer la siguiente condición: $T_0 \in X$, tal que:

$$X = \left\{ \frac{1}{365}, \frac{a}{52} \right\}, \text{ donde } a \text{ es un entero positivo.}$$

4. Por otro lado, asumen que cada orden entregada al cliente es el lote completo, y la condición que debe cumplir está dada por: $n_i T_0 = (N_i / x_i) T_0$. Donde: n_i es un entero positivo, y establece que el período de suministro para el cliente i es $n_i T_0$, y N_i es un entero positivo, que establece que el periodo para lanzar una ordenar del cliente i es $N_i T_0$. Y finalmente, que x_i es un entero positivo, determinado como $x_i = (N_i / n_i)$.

La experimentación y aplicación del modelo se llevó a cabo para el caso de cinco clientes y un proveedor, fijando también una tasa de descuento del 10%. Entre los resultados más relevantes obtenidos a la modificación del modelo de Viswanathan y Piplani (2001), se detectaron los siguientes aspectos:

- a) Comparando los resultados con el caso analizado por Viswanathan y Piplani (2001), los ahorros para el proveedor son mayores en un promedio de tres veces mejor que los del cliente. Es decir, la situación se invierte. Sin embargo, bajo las condiciones propuestas por Chang y Tsai (2002) y adoptando la estrategia *ECR*, los ahorros para el sistema son mejores.

- b) El período de abasto del proveedor se reduce con un incremento en los costes de almacenamiento.
- c) Los ahorros con la estrategia *ECR*, el sistema alcanza ahorros de alrededor del 14%.
- d) Si los costes A_s se mantienen constantes y A_i aumenta, el resultado es que se producirá más ahorros para el proveedor y el sistema. Los costes ahorrados por el proveedor y el sistema se incrementarán gradualmente a medida que A_i mantenga un valor específico y A_s se incremente.

Con relación a sus conclusiones más importantes, Chang y Tsai (2002) destacan que a diferencia del modelo de Viswanathan y Piplani (2001), que sólo beneficia a los clientes y que en pocos casos se presentan beneficios para ambos eslabones en la cadena, su modelo permite ahorros significativos en costes de manera simultánea en todos los casos estudiados, tanto para el proveedor como para el cliente.

El análisis del modelo de Chang y Tsai (2002) permite observar que se establecen ciertas diferencias que pueden ser identificadas como los primeros intentos por extender el modelo de Viswanathan y Piplani (2001) en un contexto más abierto y de interrelación empresarial. La consideración explícita de los costes de abasto/transporte, en los que incurre el proveedor, y los costes de recibo o procesamiento de órdenes por parte del cliente así lo manifiestan.

Por lo que se refiere al modelo de Reyes y Gaytán (2003) puede observarse que su formulación considera supuestos muy diferentes en comparación de los trabajos de Viswanathan y Piplani (2001) y Chang y Tsai (2002). El uso de un algoritmo como el de Wagner y Whitin (1958), les permite diseñar el modelo en un contexto dinámico con demanda variable en el tiempo, tal como en muchos casos de la vida real se presenta.

En la función de costes del cliente, además de los costes por manutención de inventarios y por ordenar, se agregan los costes de transporte y de inventario, restando el descuento que le aplica el proveedor cuando acepta la estrategia *ECR*.

En los tres modelos analizados, se lleva a cabo un análisis numérico en los que se determinan los ahorros obtenidos por el proveedor, el cliente y el sistema (cliente-proveedor), al usar la estrategia ECR en lugar de la no coordinada.

Para realizar el estudio comparativo de ambos enfoques, Reyes y Gaytán (2003) diseñan diversos problemas de prueba que consideraron variantes a los parámetros asociados a la estrategia ECR, tales como: el coste por procesar ordenes de compra y tipo de demanda que experimentan los clientes; conservando fijos los costes por mantener inventario en almacén y en tránsito, así como los costes de transporte.

Cabe señalar que este modelo, aunque ya incluye la participación de dos modos diferentes de transporte en lo que se refiere a la cantidad de carga movida por cada uno en el proceso de abasto, en dicha consideración la proporción es determinada previamente fijándose como un parámetro y no como un variable de decisión.

Por otro lado, el hecho de tener en cuenta de manera explícita los modos de transporte, dedujeron que la estrategia ECR puede funcionar favorablemente, no sólo en una cadena de suministro que cuente con un tipo de demanda variable en el tiempo, sino también donde los participantes de la cadena se encuentren en diferentes ubicaciones geográficas y sea oportuno optimizar la utilización de los modos de transporte existentes, necesarios para llevar a cabo el flujo de materiales, desde el proveedor hasta el cliente.

Muchas son las deducciones a las que llegan Reyes y Gaytán (2003) a partir del modelado de los casos empleados, en el cual demuestran cómo influye el valor de los parámetros modificados (A_s , A_i y $D_{i,t}$) en el resultado de la estrategia ECR. Genéricamente hablando, su experimentación permite identificar las condiciones bajo las cuales existen mayores o menores posibilidades de que la estrategia ECR ofrezca beneficios. Pero quizá lo más interesante es que proporcionan las bases para orientar a los socios comerciales en la cadena de suministro, dónde y cuánto deben rectificar sus costes (o modificar sus actividades) con el propósito de hacer crecer sus utilidades. Por supuesto, esto último es una de las grandes ventajas al formular matemáticamente los problemas de gestión.

Con el propósito observar de manera simplificada el enfoque y las cualidades que distinguen a los modelos de referencia analizados, en el cuadro 5.1 a continuación se presenta un resumen de sus características más relevantes.

Cuadro 5.1
Resumen de las características de los modelos de referencia

Características	Autores		
	Viswanathan y Piplani	Chang y Tsai	Reyes y Gaytán
Año	2001	2002	2003
Demanda	Determinista y constante	Determinista y constante	Determinista y variable
Producto	Un producto	Un producto	Multi-producto
Eslabones	Un proveedor y varios clientes	Un proveedor y varios clientes	Un proveedor y un cliente
Horizonte de planeación	Infinito	Infinito	Finito
Precio del producto	Variable por descuento	Variable por descuento	Único para todos Variable por descuento
Estrategia	ECR	ECR	ECR
Control del canal	Cliente	Cliente	Cliente
Transporte de los productos	Implícito en la formulación del modelo	Implícito en la formulación del modelo	Explícito predefinido (dos modos)
Enfoques de modelado	Programación lineal entera	Programación lineal entera	Programación lineal entera
Función objetivo	Minimizar costes	Minimizar costes	Minimizar costes
Objetivos a optimizar por el proveedor	1) Coste por procesar cada orden lanzada (<i>set up</i>) 2) Coste por atender un conjunto de órdenes 3) Coste del descuento aplicado al producto	1) Coste por procesar cada orden lanzada (<i>set up</i>) 2) Coste por atender un conjunto de órdenes 3) Coste del descuento aplicado al producto 4) Costes por enviar la orden (transporte)	1) Coste por procesar cada orden lanzada (<i>set up</i>) 2) Coste por atender un conjunto de órdenes 3) Coste del descuento aplicado al producto
Objetivos a optimizar por el (o los) cliente(s)	1) Coste por ordenar 2) Coste de almacenamiento	1) Coste por ordenar 2) Coste de almacenamiento 3) Costes de recibo de la orden	1) Coste por ordenar 2) Coste de almacenamiento 3) Coste de inventario en tránsito 4) Coste de transporte
Variables de decisión	1) Cantidad óptima de la orden 2) Determinación del período de suministro 3) Cálculo del descuento aplicado en los productos	1) Cantidad óptima de la orden 2) Determinación del período de suministro 3) Cálculo del descuento aplicado en los productos	1) Cantidad óptima de la orden 2) Determinación del período de suministro 3) Nivel de inventario por período 4) Cálculo del descuento aplicado en los productos 5) Cantidad transportada por modo de transporte (*)

Nota (*): Este modelo calcula la cantidad de carga transportada por modo a partir de un reparto predefinido.

5.3 Fundamentos teóricos

En esta sección se rescatan las teorías y algoritmos empleados en la formulación de los modelos analizados en la sección precedente. La idea principal, tiene el propósito de ilustrar los conceptos teóricos que soportan los modelos propuestos en este trabajo de investigación en el contexto de la teoría de los inventarios. En primer lugar, se hace una

revisión del concepto de la teoría de juegos, y de manera especial de la teoría de Stackegelberg; después, se revisa las bases que fundamentan la gestión de inventarios a partir de los modelos básicos de la producción; y al final, se presenta el algoritmo de Wagner y Whitin, el cual demuestra la formulación de los modelos desde un punto de vista dinámico.

5.3.1 Teoría de juegos en el sistema de abastecimiento

La teoría de Juegos se utiliza para resolver problemas de toma de decisiones entre dos o más individuos que están sujetos a diversos factores; en general, dichos factores conllevan cierto grado de incertidumbre respecto de la decisión que adoptará el otro jugador, por lo tanto, el resultado que obtendrá cada jugador por su elección, dependerá de la elección del otro.

Kelly (2003), señala que tomar una decisión es elegir un curso de acción, dentro de un juego de habilidad, oportunidad o de estrategia. Afirma que muchas decisiones, en el contexto de la teoría de juegos, algunas veces son tomadas de manera simultánea o secuencial, por lo general de manera independiente de la naturaleza del juego.

En la teoría de juegos, la toma de decisiones simultáneas implica que todos los jugadores toman cursos de acción (o seleccionan una estrategia) sin conocer las estrategias que están siendo elegidas por otros jugadores. Incluso, aun cuando las decisiones se tomen en distintos momentos de tiempo, el juego es considerado simultáneo porque cada jugador no tiene información sobre las decisiones de los otros. Los juegos simultáneos son representados por la *forma normal* y se resuelven utilizando el concepto de equilibrio de Nash.

Por lo que respecta a la toma de decisiones secuenciales, los jugadores seleccionan una estrategia después de cierto orden predefinido, y que al menos, algunos pudieran observar los movimientos de los jugadores que los precedieron. Si ningún jugador observa los movimientos de los jugadores anteriores, entonces el juego es simultáneo. Si cada uno de los jugadores observan los movimientos de los otros jugadores que lo preceden, el juego es denominado como de “*información perfecta*”. Si algunos (pero no todos) los jugadores observan movimientos previos, mientras los otros se mueven simultáneamente, el juego es considerado de “*información imperfecta*”. Los

juegos secuenciales son representados por árboles de juego (*forma extensa*) y son solucionados con la utilización del concepto de *rollback* (reducción), o equilibrio del sub-juego perfecto.

A partir de las definiciones anteriores, es claro observar que la toma de decisiones en la cadena de suministro sigue este tipo de juegos. En la práctica, el poder de negociación es un factor que da la pauta a una gran cantidad de estrategias que pueden ser atendidas con la teoría de juegos. Por ejemplo, cuando los compradores tienen un poder de negociación fuerte o creciente, harán que los precios bajen, exigirán más calidad o servicios y enfrentarán a los competidores entre sí, todo a expensas de la rentabilidad de los proveedores; como respuesta, éstos asumirán una estrategia que contrarrestare dicha posición. Por el contrario, cuando el poder de negociación es de los proveedores, pueden subir los precios o abastecer la cantidad que más le convenga.

El poder de los proveedores suele aumentar cuando éstos se concentran u organizan, cuando hay pocos sustitutos, cuando el producto suministrado es un insumo importante, cuando los costes de cambiar un proveedor son elevados y cuando los proveedores pueden integrarse hacia abajo en la cadena de suministro. Evidentemente, los clientes desarrollaran sus propias estrategias.

Para protegerse, y tomar decisiones adecuadas, lo más recomendable es desarrollar relaciones mutuamente provechosas entre proveedores y clientes basadas en estrategias de colaboración.

Dicha asociación de estrategias, en la gestión de la cadena de suministro implica la construcción de pequeños esquemas de organización que permiten distinguir una interrelación empresarial en el contexto de los modelos de tipo Oligopolio. Este modelo se da cuando pocas empresas tienen influencia por los precios en el mercado. Existen pocos vendedores pero ninguno domina. Al ser pocos, pueden confabularse para influir sobre los precios y las cantidades; es decir, tienen la capacidad de actuar en colusión.

Utilizando el enfoque basado en la toma de decisiones secuenciales en el sistema de abastecimiento; y actuando en colusión, se asume que un cliente reconoce que el resultado de su elección de la estrategia de suministro dependerá de lo que adopte su proveedor, lo cual deberá tomar en cuenta al tomar su decisión; es decir, elegirá su

estrategia óptima de abastecimiento de tal modo que obtenga el máximo beneficio posible dada la mejor estrategia que puede adoptar su proveedor siendo que este también efectúa dicho razonamiento.

5.3.1.1 Modelos de Oligopolio

Justamente, en el contexto del paradigma de la colusión, existen distintos modelos de Oligopolio de entre los cuales, los cuatro más conocidos se refieren a dos criterios de clasificación, ya sea porque las empresas compiten en precios o en cantidades producidas, o porque las decisiones las toman en forma simultánea o secuencial. Los cuatro modelos llevan los nombres de de sus autores conocido como: Oligopolio de Cournot, Bertrand, Forchheimer y Stackelberg.

Cournot desarrolló en 1838 un equilibrio entre empresas que compiten en forma simultánea fijando cantidades. Una aplicación del mismo pero compitiendo por precios (y no por cantidad) ha sido desarrollada por Bertrand. Ambos modelos son desarrollados en el contexto del mercado de competencia perfecta.

Por su parte, Forchheimer y Stackelberg, desarrollaron sus modelos en donde el ejercicio del poder de mercado adopta una forma especial cuando se analizan en escenarios que, sin ser monopólicos, cuentan con una sola empresa principal y con una o varias empresas menos importantes que toman sus decisiones respondiendo a lo que dicha empresa principal hace (es decir, las decisiones no se toman en forma simultánea sino secuencial), dando lugar a los modelos liderazgo en precios y en cantidades, respectivamente (es decir, hay una empresa líder del mercado, y un seguidor).

El modelo de liderazgo en precios de Forchheimer supone la existencia de una única empresa con capacidad de fijar precios y de un conjunto de empresas (pequeñas en relación con la anterior) que actúan como tomadoras de precios. En esos casos se habla de que la empresa principal actúa como líder de precios y que las restantes empresas actúan como un grupo de seguidores o “*competidores periféricos*” (*competitive fringe*).

Stackelberg desarrollo en 1934 un modelo de duopolio dinámico donde supone dos empresas que deciden competir por cantidad. Una, juega primero y decide cuánto producir, él la denomina “empresa líder”; la otra, juega después fijando su producción

sólo luego de ver cuanto produce la líder, a esta la llama “*empresa seguidora*”. Establece que la demanda total del mercado se reparte entre ambas, siendo una la demanda que atiende el seguidor, y el resto (llamada “*demanda residual*”) la que abastece el líder.

Precisamente, teniendo de referencia el modelo de Stackelberg, a continuación se adapta este tipo de relaciones al sistema de abastecimiento y la coordinación de inventarios entre un cliente y un proveedor, considerando que los eslabones de la cadena de suministro toman decisiones en forma secuencial.

5.3.1.2 El modelo de Stackelberg en la gestión de inventarios

Mientras que muchos modelos en la cadena de suministro son estáticos, una parte significativa de la literatura es afectada a desarrollar modelos dinámicos en los cuales las decisiones son tomadas en momentos diferentes. En muchos casos, la solución conceptual de estos juegos es similar a un esquema de “*inducción recursiva*” utilizada cuando se resuelven problemas de programación dinámica. En el caso de los modelos dinámicos, el enfoque del juego es que cada jugador tiene información completa de las acciones de los otros jugadores (Cachon y Netessine, 2004).

Justamente, Heinrich von Stackelberg introdujo el primer juego dinámico de esta naturaleza. Aplicado al sistema de inventarios, uno de los jugadores selecciona (y anuncia) su nivel de inventario máximo. Teniendo en cuenta esta información, el otro jugador realiza su primer movimiento buscando dar la mejor respuesta anticipada al otro jugador, logrando obtener cierta ventaja e influir en sus decisiones. Este esquema, proporciona un marco coherente para modelar acciones donde uno de los jugadores se convierte en el líder y domina las decisiones del nivel de inventarios en la cadena de suministro (Jemai y Karaesmen, 2005).

Diversos autores han externado que los resultados del juego de Stackelberg son diferentes, dependiendo quién comience el juego (Dimand, 1996; Kelly, 2003). Para el caso que el proveedor actúe como líder, seleccionará suministrar Q_V^* cantidades de producto que minimice sus costes $C_V = (Q_V^*, Q_B^*)$ utilizando ciertos mecanismos (por ejemplo, descuento en el precio) y conociendo que el cliente pedirá Q_B^* . Por lo tanto:

$$Q_V^* = \arg \min_{Q_V} (C_V(Q_V, Q_B^*(Q_V))) \text{ y } Q_B^* = Q_B^*(Q_V^*) \quad (5b.1)$$

Similarmente, cuando el cliente es el líder, seleccionará su nivel óptimo de inventario, como:

$$Q_B^* = \arg \min_{Q_B} (C_B(Q_V^*(Q_B), Q_B)) \text{ y } Q_V^* = Q_V^*(Q_B^*) \quad (5b.2)$$

Este modelo lleva a la conclusión de que existe un punto de equilibrio en el cual las empresas pueden acceder a una coordinación de su nivel de inventario a través de la coalición.

El planteamiento de la coordinación de inventarios, en este contexto, se lleva a cabo considerando que los miembros de la cadena de suministro comparten totalmente información. En términos de Meca, *et al.* (1991), cada empresa $i \in N$ revela su demanda (d_i), su coste de almacenamiento (h_i), el número individual de órdenes (m_i), y su tamaño de orden óptimo (Q_i^*). Considerando que no existen límites en la capacidad de almacenamiento, los costes de transporte son iguales a cero y el tiempo de ciclo es determinista; Meca, *et al.* (1991) considera que la coordinación puede darse con respecto a los costes de almacenaje, es decir, si una empresa de la coalición tiene muy bajos costes de almacenaje, entonces esta coalición reducirá sus costes totales si el inventario se almacena en el local de esa empresa.

El coste promedio por unidad de tiempo de una coalición de empresas (S) está constituido por los costes de almacenar y los costes por ordenar. Considerando que los costes totales son minimizados si los ciclos totales son iguales, se define que $Q_i/d_i = Q_j/d_j$ para toda $i, j \in S$. En términos generales, se asume que la empresa 1 es miembro de la coalición (S). Por lo tanto, puede expresarse a (Q_i) como una función de (Q_1) para toda $i \in S$: $Q_i = d_i Q_j/d_j$. En cada ciclo, la coalición lanza una orden conjunta a un coste (a), así que el coste promedio por ordenar por unidad de tiempo es igual a ($a d_1/Q_1$). Todos los productos van ha ser depositados en el local de la empresa con el coste más bajo de almacenamiento. Definido como: $h_S := \min_{i \in S} h_i$. El nivel promedio del inventario de la empresa $i \in S$ es igual a ($Q_i/2$) por unidad de tiempo y

$(h_s Q_i / 2)$, denota el coste promedio de almacenamiento por unidad de tiempo. Sumando ambos conceptos, puede deducirse que el coste promedio por unidad de tiempo para las empresas en (S) es igual a:

$$a \frac{d_1}{Q_1} + \sum_{i \in S} h_s \frac{Q_i}{2} \quad (5b.3)$$

Sustituyendo $Q_i = d_i Q_1 / d_1$, los costes pueden expresarse como una función de Q_1 , obteniendo:

$$a \frac{d_1}{Q_1} + \sum_{i \in S} h_s \frac{d_i Q_1}{2 d_1} \quad (5b.4)$$

Estos costes son minimizados si:

$$Q_1 = \sqrt{\frac{2ad_1^2}{h_s \sum_{j \in S} d_j}} \quad \text{así,} \quad Q_i = \frac{d_i}{d_1} Q_1 = \sqrt{\frac{2ad_i^2}{h_s \sum_{j \in S} d_j}} \quad (5b.5)$$

Para toda $i \in S$. El coste mínimo por unidad de tiempo para la coalición es ahora igual a:

$$\sqrt{2h_s \sum_{i \in S} d_i} \quad (5b.6)$$

La condición de los costes de almacenamiento puede ser descrita por la tupla $\langle N, a, \{h_i, d_i\}_{i \in N} \rangle$. Dado el concepto anterior, se define el correspondiente *juego de los costes de almacenamiento* (N, c_h) como el juego que asigna a la coalición $S \subset N$ su coste mínimo como en (5b.6) y $c_h(\emptyset) = 0$.

Dado el planteamiento anterior, se verifica que entre un cliente y un proveedor es factible observar que los esquemas de coordinación para la gestión de inventarios, utilizando la base teórica del modelo de Stackelberg, los miembros de la cadena podrán lograr el equilibrio al final del juego.

5.3.2 La producción y el balance de los inventarios

La logística de producción y operaciones es "...la función de la empresa que se ocupa de gestionar los procesos mediante los cuales una serie de elementos, que constituyen entradas [insumos] a estos procesos (materiales, mano de obra, capital,

información, [necesidades del cliente], etc.), se transforman en productos que tienen [mayor] valor para los clientes...” (CIDEM, 2004). Las definiciones más comunes de producción y gestión de operaciones establecen que la gestión de un conjunto de actividades crea bienes y servicios a través de la transformación de materia prima en productos finales (Chase, *et al*, 1998). Producir, forma parte del proceso fundamental de la cadena de suministro, y sus sistemas de producción en un entorno cambiante y de mercado global deben modificarse con el triple objetivo de orientarlos al cliente, hacerlos más flexibles y rápidos y reducir de manera constante los costes de operación (CIDEM, 2004).

La interacción entre la función logística de producción y la gestión de la cadena de suministro, básicamente se centra en la coordinación de las actividades logísticas para el control de inventarios y la distribución de los productos a través de la determinación de la estrategia, programación y tamaño del lote de fabricación.

En términos generales, Toniolo y Clark (2001) reportan que el modelo básico del sistema de producción, considera sólo un eslabón en la cadena y un producto fabricado durante un período de tiempo (T), con capacidad infinita de producción. Su enfoque busca minimizar los costes de inventario a partir del establecimiento del tamaño de lote de producción x_t (variable de decisión) del período (t) en curso, es decir:

$$\text{Minimizar } \sum_{t=1}^T hI_t \quad (5b.7)$$

Sujeto a restricciones de balance de los inventarios que buscan satisfacer los requerimientos de la demanda (d_t), considerando los productos disponibles al inicio (I_{t-1}) y al final (I_t) de cada período (t), es decir:

$$I_{t-1} + x_t - I_t = d_t \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (5b.8)$$

$$\text{con } I_t \geq 0, \text{ y } x_t \geq 0 \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (5b.9)$$

Note: Cuado se produce exactamente la misma cantidad que se demanda, ($x = d_t \quad \forall t = 1, \dots, T$), el modelo básico tiene una solución trivial, ya que todo (I_t) será siempre igual a cero.

Por otro lado, de acuerdo con López y Sabater (1998),¹ en el contexto de la teoría de los recursos, todo tipo de sistema operativo tiene limitaciones de capacidad, y por lo tanto, el supuesto de “producción infinita” del modelo básico se encuentra fuera de toda realidad. En este sentido, el sistema logístico de producción no es la excepción pues presenta una capacidad máxima (C_t) de unidades de producción (x_t) en cada período (t), es decir: $x_t \leq C_t, \forall t$.

Si la demanda es mayor que la capacidad de producción ($d_t > C_t$), no es trivial esperar encontrar una solución óptima. Sin embargo, se está en presencia de faltantes en la producción (*Backlogging*).

Si los faltantes son permitidos en el sistema de producción (que se da con relativa frecuencia), la solución al problema debe buscar minimizar también los costes que ello origina, es decir:

$$\text{Minimizar } \sum_t hI_t^+ + gI_t^- \quad (5b.10)$$

En donde, el parámetro (g) representa la penalización por el faltante de una unidad de producto de un período al siguiente.

Por lo que respecta a los requerimientos de la demanda, ésta se satisface considerando el balance de los inventarios entre lo disponible (I_t^+) y los faltantes (I_t^-) al final de cada período, ello significa que la demanda (d_t), en función de la cantidad programada de producción x_t , puede presentarse como:

$$I_{t-1}^+ - I_{t-1}^- + x_t - I_t^+ - I_t^- = d_t \quad \forall t \quad (5b.11)$$

Considerando las restricciones de capacidad y no negatividad:

$$x_t \leq C_t \quad \forall t \quad (5b.12)$$

$$I_t^+ \geq 0, I_t^- \geq 0 \text{ y } x_t \geq 0 \quad \forall t \quad (5b.13)$$

¹ La teoría de los recursos define a la empresa como una colección única de recursos y capacidades que no pueden comprarse y venderse libremente en el mercado (Conner, 1991; Rumelt, 1987; Wernerfelt, 1984). Para esta teoría, la empresa constituye el nivel de análisis adecuado, y su misión principal es el estudio de las diferencias en los resultados empresariales. Su premisa fundamental es la existencia de heterogeneidad entre las empresas en cuanto a los recursos que controlan, siendo dicha heterogeneidad la que explica los diferentes resultados obtenidos por cada una de ellas (Lippman y Rumelt, 1982; Rumelt, 1984; Barney, 1991). Desarrollada en el seno de la dirección estratégica pretende ofrecer una guía normativa para alcanzar una profunda comprensión de las fuentes de la ventaja competitiva (Wernerfelt, 1984; Rumelt, 1984; Winter, 1995); objetivo que se centra en la idea de explotar las oportunidades de beneficios latentes en la dotación idiosincrásica de recursos de la empresa (Winter, 1995). (López y Sabater, 1998).

5.3.3 El algoritmo de Wagner y Whitin

En 1958 Wagner y Whitin publicaron su documento “*Dynamic Version of the Economic Lot Size Model*”, en el cual propusieron un algoritmo que resuelve el problema del tamaño de lote de producción para un horizonte de planeación preestablecido, conocido como “*Economic Lot-Size Problem*” (ELSP). Para Toniolo y Clark (2001) fue una primera variante realizada al modelo original del problema del tamaño de lote de producción.

Desde el punto de vista de los inventarios, de acuerdo con Van Hoesel y Wagelmans (1990), el algoritmo determina el tamaño de lote a pedir para satisfacer la demanda de un horizonte de planeación de N períodos al mínimo coste de abastecimiento y de inventarios. Permite calcular el inventario remanente para satisfacer la demanda futura, pero no permite retrasos (*backlogging*) o pendientes de entregas. Para cada período el coste total (CT) para la gestión de la producción y los inventarios está constituido por tres componentes principales: un coste de producción, un coste de almacenamiento, y un coste por abastecer una orden del cliente (*set up*) por un cambio en el proceso de fabricación (ya sea por preparación de la máquina o por culminación del lote de fabricación), que se incurre si un producto es ordenado en el período t , el cual debe ser minimizado, es decir:

$$\text{Minimizar } CT = v \left(\sum_{t=1}^T d_t \right) + \sum_{t=1}^T hI_t + \sum_{t=1}^T Ay_t \quad (5b.14)$$

Donde: v = Coste unitario o precio del producto [\\$]

d_t = Demanda de unidades en el período t [unidades]

I_t = Nivel de inventario en el período t [unidades]

h = Coste de almacenar una unidad en el periodo t [\$/unidad-tiempo]

A = Coste unitario de preparación o atender una orden del cliente [\$/unidad]

T = Número total de períodos (horizonte de planeación)

t = Período; y sea $y_t \in \{0, 1\}$.

Jans y Degraeve (2005) reportan que Zangwill (en 1969), demostró que este modelo puede verse como un problema de redes. Por ejemplo, sea la figura 5.2 en

donde se establece que los arcos $(0-t)$ corresponde a las variables de decisión de producción o tamaño de la orden lanzada Q_t , que está asociada a un coste unitario v . Sí la cantidad ordenada es estrictamente positiva $Q_t > 0$, entonces existe un coste fijo de A en el arco. Los arcos $(t-1,t), (t,t+1)...$ corresponden a las variables de inventario I_t y tienen un coste por unidad de flujo de h . En términos de la red se dice que 0 es un nodo de oferta, y los nodos t son nodos de demanda.

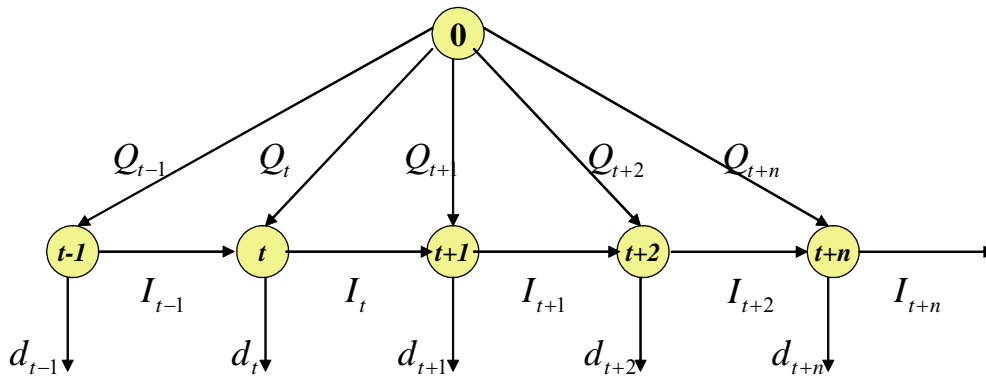


Figura 5.2
Red del problema del tamaño de lote

Fuente: Modificado de Jans y Degraeve (2005).

Por lo tanto la ecuación correspondiente a la restricción de conservación de flujos (balance de inventarios) esta dada como:

$$I_{t-1} + Q_t - I_t = d_t \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (5b.15)$$

con $I_t \geq 0$, y $Q_t \geq 0 \quad \forall t = 1, \dots, T$

Sujeto a restricciones de balance de los inventarios que buscan satisfacer los requerimientos de la demanda (d_t), considerando los productos disponibles al inicio (I_{t-1}) y al final (I_t) de cada período (t), de acuerdo al tamaño del lote ordenado (Q_t), es decir:

Toniolo y Clark, 2001, aclaran el hecho de que a veces puede ser más económico pagar un coste por concepto de inventario, que incurrir en costes fijos por preparación de máquinas en cada período. Al respecto, Jans y Degraeve (2005), señalan que esto trabaja como una especie de intercambio (*tradeoff*). Por este motivo Wagner y Whitin

introducen la variable binaria de decisión y_t , con valor de 1 si los costes de preparación ocurren al final de período t ; y 0 de otra manera. Por lo tanto, el tamaño de lote de producción o de abastecimiento (Q_t) deberá estar delimitado por una cota superior (M_t , por ejemplo, capacidad de planta), es decir:

$$Q_t \leq My_t. \quad \forall t \quad (5b.16)$$

Cabe señalar que la evolución de los sistemas de producción, desde la producción artesanal, hasta los esquemas como la producción ajustada, balance de líneas (Gökçen y Ağpak, 2004), *flow shop* (Yokohama y Santos, 2005), *Job Shop* (Hurink y Knust, 2005), y otros, pasando por los tradicionales sistemas en línea, han hecho que muchos investigadores y practicantes desarrollen modelos matemáticos más complejos para su estudio.

Desde el punto de vista de la cadena de suministro, los modelos de solución han sido extendidos hacia el análisis y solución de problemas multi-eslabón con muy diversas variantes. En términos generales, se busca determinar el tamaño de la producción nivel por nivel para evitar grandes inventarios. Es decir, buscan definir la cantidad del lote para cada eslabón en la cadena (véase, Lozano, *et al*, 1991; Baker, 1993).

5.4 Exposición y planteamiento del problema de estudio

En el ámbito de la logística empresarial, regularmente la gestión no sólo comprende la administración de los recursos, sino también la operación de éstos y la ejecución coordinada de las tareas logísticas, tanto al interior como al exterior de la empresa en una especie de cadena. Por lo tanto, la coordinación de las actividades logísticas es un formalismo que no se da por si solo, sino que éste se debe encontrar mediante la gestión explícita de los procesos de negocios.

A pesar de la importancia y relevancia de las relaciones de colaboración y las necesidades de coordinación, una investigación realizada de manera paralela a la presente tesis (Jiménez, 2004), pone de manifiesto que en México este tipo de prácticas logísticas no ha logrado desarrollarse del todo, pues reporta que los empresarios no están preparados para ello. Especifica que no existe buena voluntad y confianza para

compartir información, tecnología u otro tipo de recursos, limitando el escenario de las estrategias horizontales y el desarrollo de interrelaciones más formales. Como resultado de esta situación, de acuerdo con datos del gobierno mexicano, los costes logísticos a nivel global equivalen al 15% de su Producto Interno Bruto. Fuentes oficiales de la Secretaría de Economía, señalan que en el 2004 la mayoría de las empresas mexicanas destinaron alrededor del 12.5% de sus gastos totales a este segmento. De esta cifra, 40% se consignan al transporte y 60% a inventarios y almacenaje. Estiman que parte de esta problemática se debe a la falta de una mejor coordinación entre clientes y proveedores (Ortega, 2004).

Por este motivo, esta sección tiene como objetivo principal, describir de manera pormenorizada el planteamiento del problema de investigación relacionado con la coordinación de los inventarios entre un cliente y un proveedor, considerando el suministro de productos a través de diversos modos de transporte en el contexto del comercio internacional, utilizando la estrategia de gestión ECR con demanda dinámica y políticas de descuento en el precio de los productos y en las tarifas de transporte.

5.4.1 Visión general del problema

La globalización y la dispersión geográfica de los miembros de la cadena de suministro están obligando a las empresas a realizar grandes esfuerzos para la colaboración, con miras a mejorar su ventaja competitiva (Dyer y Singh, 1998; Simatupang y Sridhan, 2002). El trabajo conjunto y la colaboración, han permitido a las empresas obtener mejores retornos de la inversión y mejorar la administración de los inventarios (Walter, *et al*, 2000). Por ejemplo, en el sector de tiendas departamentales, el modelo CPFR (Parks, 2001) ha permitido que empresas como Wal-Mart y sus proveedores obtengan beneficios al realizar pronósticos conjuntos, planes de abasto y planeación realizados en forma colaborativa. Sin embargo, no hay una única estrategia o modelo de coordinación que haya mostrado su aplicabilidad en todos los sectores productivos.

Para el caso de sectores industriales como el de la automoción, que tiene una gran cantidad de SKU's (*Stock Keeping Unit*),² y gran cantidad de proveedores, la

² Es un término común que significa: "identificador numérico único", que es utilizado para referirse a un producto específico en el inventario o en un catálogo

aplicabilidad de modelos como el CPFR es limitada, ya que los proveedores se encuentran en diversas partes del mundo y los tiempos de abastecimiento son grandes, por lo que un resurtido frecuente en muchos casos no es viable.

El hecho es que en diversos sectores industriales, se presentan casos en que los componentes son abastecidos por empresas que se encuentran en sitios alejados entre sí, formando grandes redes de suministro alrededor del mundo. Los envíos de estos componentes, entre plantas de producción y centros de distribución o consumo (por ejemplo, ensamble), son efectuados a través de los modos de transporte disponibles (o cadenas de transporte) a los que están asociados diferentes costes y tiempos de recorrido.

Ante esto, el tomador de decisiones constantemente se enfrenta al problema de diseñar una estrategia de gestión de inventarios para compensar los costes de la cadena de suministro, buscando altos niveles de servicio. Dicho de otra manera, el problema se centra en que los gerentes quieren garantizar un alto nivel de disponibilidad de los componentes (nivel de servicio) y minimizar el nivel de inventario sólo desde el punto de vista del coste.

5.4.2 La cadena de suministro y la cadena de transporte

Como ya se mencionó anteriormente, muchos de los componentes son ensamblados (o consumidos) en sitios muy distantes de su lugar de fabricación, y generalmente son abastecidos por proveedores que realizan funciones de tercerización. El tiempo de ciclo para el suministro de los componentes en estos casos es muy variado y puede llegar a ser tan grande que afecte la rentabilidad de las compañías que participan en el proceso (ya sea cliente o proveedor). El diseño de una cadena de suministro debe tener en cuenta esta consideración, y con mucho mayor razón si el tiempo que toma el ensamblaje tiene una duración muy corta y cuando se dispone de la capacidad necesaria.

Una planta de ensamble (o almacén), puede estar situada en el mismo complejo industrial de su proveedor y no requerir un tiempo de ciclo mayor o tener que elegir entre diferentes modos o cadenas de transporte. Sin embargo, el problema de un

proveedor externo podría ser el de escoger entre el avión o el barco y tener que determinar el tiempo de ciclo que cumpla con sus expectativas de abasto.

El transporte por avión podría requerir una semana, mientras que el barco podría tomar varias veces el tiempo del primero; claro está, dependiendo de la distancia entre el origen y el destino de los productos, así como de la logística que se instrumente. En tal caso, el tipo de envío por uno u otro modo incluyen los tiempos de carga y descarga, así como los tiempos correspondientes a las conexiones terrestres (que forman parte de las cadenas de transporte). Esto trae como consecuencia que existan transbordos de las mercancías en puertos y aeropuertos o centro de almacenamiento (o, terminales de carga), los cuales afectan de manera importante el tiempo de ciclo en el suministro de los componentes.

5.4.3 Los costes y las medidas de desempeño

Los tipos de costes asociados con la operación de la cadena de suministro, y en particular con el sistema de inventarios, son los costes por emitir y procesar órdenes (*set up*), por manutención de productos en almacenes y en tránsito (que bien pueden incluir: costes por obsolescencia o depreciación), así como los costes de transporte.

Debido a que el inventario en la cadena de suministro debe ser financiado, los costes de almacenamiento son aplicados al inventario en cualquier localización o durante el tránsito de los productos entre dos eslabones de la cadena. Los cargos financieros son proporcionales al coste de manutención de inventarios, y se expresan como un porcentaje del coste de los materiales por año.

Si un producto final no es vendido antes de que termine su ciclo de vida, la pérdida de ingresos puede ser substancial. Algunos productos en este caso, solo podrán ser vendidos como “saldos”; otros, deberán ser desmantelados y vendidos por partes, o en el peor de los casos, amortizados (Beyer y Ward, 2000). Para estos autores, los componentes de un producto final son menos vulnerables a la obsolescencia debido a que son utilizados en productos subsecuentes. Por ejemplo, en la industria de la computación, un disco duro normalmente es utilizado en múltiples productos finales dentro de su línea de producción (por ejemplo, ordenadores de diferentes modelos), haciendo que su ciclo de vida sea mucho más grande que el de algún producto en

particular. En la industria del automóvil existen muchos ejemplos donde los componentes son diseñados a partir de este enfoque.

Cuando un producto final se vuelve obsoleto, en ocasiones una pequeña fracción de los costes de los materiales es recuperada. Un hecho irrefutable es que el coste de un componente es mucho menor debido a que éste puede ser utilizado en otros productos.

El precio de los componentes necesarios para la fabricación de productos finales, generalmente declina rápidamente durante el curso de su ciclo de vida. Por lo tanto, un producto final en inventario (por ejemplo, de una semana a otra), podría haberse fabricado a un precio más bajo una semana después. Esta diferencia de precios, conocida como coste de depreciación, es aplicada a cada unidad de inventario en cada período y ubicación de almacenamiento, convirtiéndose en un factor importante en el diseño de la política de suministros.

Por lo anterior, la política de suministro se convierte en un factor clave del desempeño de la cadena de suministro. Ciertamente, el tamaño del pedido determinará los costes por atender y procesar las órdenes (*set up*). En la medida que se establezca una política óptima de pedidos, los costes por manutención de inventarios podrán ser minimizados también, tanto para el cliente como para el proveedor.

Los costes de transporte incluyen: la tarifa, seguros, costes de carga y descarga y pago de derechos arancelarios (impuestos) en el caso de importaciones/exportaciones. Los costes por barco, generalmente son pagados por contenedor embarcado; mientras, el coste por avión es cobrado por paleta o tarima (*pallet*) con base en el peso y las dimensiones. Beyer y Ward (2000) señala que las tarifas marítimas representan la quinta parte de las tarifas aéreas. La combinación con modos terrestres (por ejemplo, camión y ferrocarril), dan origen a diferentes combinaciones de costes totales por concepto de transporte.

En términos generales, el desempeño de la cadena de suministro actualmente es medido por: *i*) la disponibilidad de productos en anaquel para su consumo, *ii*) por el porcentaje de órdenes cumplidas por unidad de tiempo, y *iii*) por los costes totales en los que se incurre. Hasta el momento, en el suministro de componentes (o productos

finales) no se incluye la evaluación el servicio de transporte como medida de desempeño.

5.4.4 La coordinación de los inventarios y el uso combinado del transporte en el contexto internacional

Dentro de la decisión de abasto, un elemento crítico es la definición de políticas de inventario conjuntas que consideren explícitamente los largos tiempos de transporte, asociados con productos que se obtienen de proveedores localizados en otros continentes. La definición de estas políticas conjuntas, requiere de establecer métricas comunes para proveedor, comprador y transportista; el intercambio de información entre participantes; así como ceder al proveedor la decisión de cuándo es más conveniente surtir el producto, en qué cantidades y cómo transportarlo (combinación modal). Algunas de las ventajas de la coordinación de inventarios, para el caso de un cliente que adquiere diversos productos de un mismo proveedor (equivalente a varios clientes que tiene un proveedor común), son: ahorros en costes unitarios de compra, ahorro en los costes unitarios de transporte, ahorro en los costes por ordenar (Silver, *et al.* 1998).

La determinación de políticas de inventarios coordinadas, que consideren explícitamente la selección del modo de transporte, ha sido poco estudiada en la literatura a pesar de su importancia intrínseca. Para el caso del sector industrial mexicano, que adquiere/vende productos principalmente de Norteamérica y Europa, los tiempos de viaje son significativos, y por lo tanto, hace necesario contar con mecanismos eficientes que permitan definir las políticas conjuntas de inventarios y de selección de los modos de transporte, en virtud de que los costes por almacenamiento y tránsito de las mercancías pueden representar cantidades importantes. Adicionalmente, la importación/exportación de productos requiere que el proveedor y comprador acuerden el *Incoterm* más conveniente, ya que esta decisión influye en las políticas de inventarios debido a que los costes y tiempos de traslado se ven influenciados por quienes realicen el transporte y la importación/exportación.

En particular, el problema de la coordinación de los inventarios reside en que las empresas tratan de optimizar individualmente sus beneficios, muchas veces en perjuicio de su cliente o proveedor. Diseñan políticas de inventario, por ejemplo, sin considerar la capacidad de respuesta de su contraparte comercial o algún otro tipo de factor, como

es el caso de la operación del transporte o tipo de negociación en el comercio internacional, creando un clima de incertidumbre que, de manera inmediata se refleja en altos costes logísticos para ambas partes.

Es común que la planeación de la producción, o lanzamiento de órdenes (y sus envíos), se base en metas individuales y con un enfoque simplista basado sólo en el coste. Así, cuando el nivel de inventarios programado llega a estar por debajo de la meta programada, generalmente es lanzada una orden urgente que deberá ser transportada por el modo más rápido. En este caso, los gerentes de logística invariablemente escogerán el avión como modo de transporte; sólo cuando se tiene excedentes en los inventarios, por desaciertos en los pronósticos, utilizarán el transporte marítimo. Como consecuencia de esta operación, podría suceder que la mayoría de los envíos se lleven a cabo por avión; y como resultado, la empresa obtendría el peor coste; eso si, posiblemente con el mejor nivel de servicio de transporte.

En tal virtud, debido a la lejanía entre las empresas, la coordinación de inventarios puede verse más favorecida con el uso de más de un criterio de decisión (en este caso, coste total logístico y nivel de servicio de transporte). En este sentido, el marco teórico sobre el uso de transporte (Benomyong y Beresford, 2001), reconoce que una combinación planificada de los modos de transporte puede arrojar menores costes, si se tiene en cuenta sus características operativas (por ejemplo, velocidad de entrega) y los diferentes niveles de servicio que ofrecen desde el punto de vista de sistema.

Por este motivo, de manera especial y de interés particular, se considera evaluar el efecto y el uso de diferentes modos de transporte en el proceso de abasto, por considerar que este elemento es uno de los factores que mayor influencia tiene sobre los costes totales en la gestión conjunta de los inventarios. Esto último, lleva a proponer que el uso combinado de los modos de transporte puede ser evaluado en términos de su operatividad y de sus atributos de servicio. En este trabajo de tesis, por ejemplo, se asume que la velocidad de entrega es uno de los factores principales del nivel de servicio y por lo tanto, se definen tres diferentes modos de transporte identificados como: rápido, medio y lento.

Adicionalmente a lo anterior, debido a que el intercambio comercial se lleva a cabo en un contexto internacional, constantemente las empresas se están enfrentando a

la disyuntiva de decidir los términos de comercialización más convenientes en la negociación (*Incoterms*). Según sea el caso, se asume que los costes y niveles de servicio de transporte contratados, ya sea por el cliente o por el proveedor, tienen diferentes impactos en el desempeño de la cadena de suministro.

A continuación se detalla la operatividad de los *Incoterms* ExW y DDP, con el propósito de tener una idea del efecto que presupone cierto tipo de negociación en el comercio internacional en el precio final de los productos. Cabe mencionar que dichos *Incoterms* representan los casos extremos de las responsabilidades de negociación que adquieren el cliente y el proveedor.

5.4.4.1 *Incoterm* ExW - *Ex Work* -en fábrica-

El proveedor cumple su obligación una vez que pone la mercancía a disposición del comprador en su propio establecimiento o en otro lugar acordado (fábrica, taller, almacén, etc.), no siendo, por lo tanto, responsable de la carga de la mercancía en el vehículo proporcionado por el cliente, ni tampoco tiene obligación alguna en lo referente a seguros, transporte o despachos y trámites aduaneros de la mercancía. Este término define la menor obligación del proveedor, debiendo el cliente asumir todos los costes y riesgos inherentes a la recepción de la mercancía en el local del proveedor (véase figura 5.3). Es el único *Incoterm* en el que el proveedor no despacha la aduana de exportación.



Figura 5.3
Términos generales en el contexto ExW

Existe la posibilidad de contratar una modalidad de ExW-Cargado, en la que el proveedor entrega la mercancía ya cargada en el camión o medio de transporte proporcionado por el comprador. Este *Incoterm* no debe usarse cuando el comprador no pueda llevar a cabo las formalidades de exportación, ni directa ni indirectamente.

5.4.4.2 *Incoterm DDP (Delivery Duty Paid) –en el local del cliente-*

Representa la obligación máxima del proveedor. Éste cumple su obligación de entrega cuando ubica la mercancía en el punto de destino acordado a disposición del comprador, ya despachada de aduana de exportación e importación, y con todos los gastos pagados. El proveedor corre con los gastos y el riesgo hasta el momento de la entrega (véase figura 5.4).

Este término no debe usarse si el proveedor no puede, ni directa ni indirectamente, obtener la licencia de importación. En tal caso, se utilizará con independencia del medio de transporte elegido. Existe la posibilidad de excluir, mediante pacto expreso e indicándolo así en el *Incoterm*, determinados conceptos de los pagos a realizar por el vendedor, dejando en este caso de ser pagados por éste y pasando a ser abonados por el cliente.

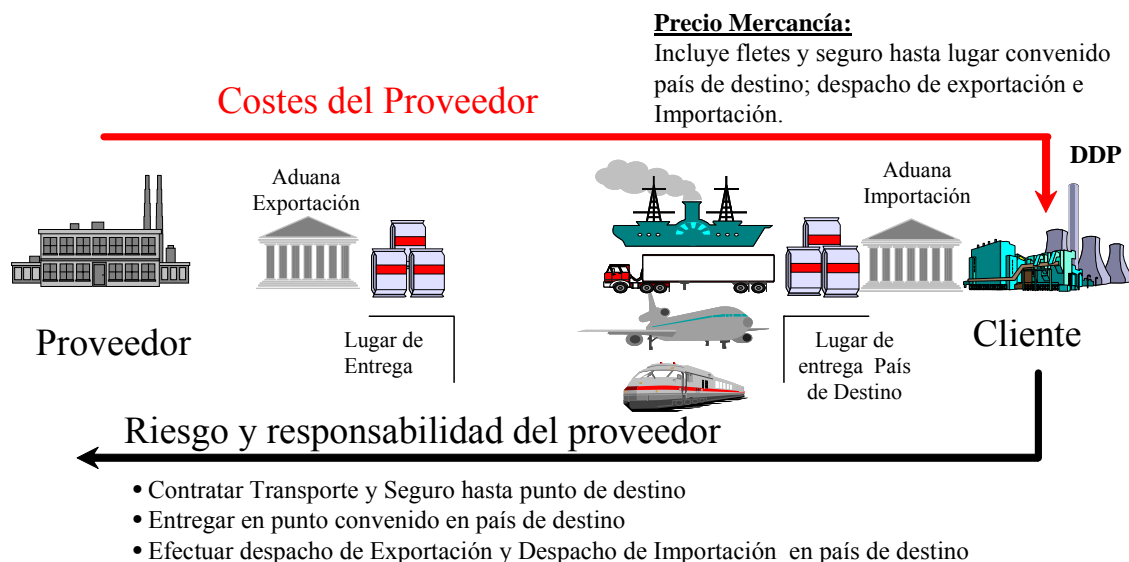


Figura 5.4
Incoterm DDP (Delivery Duty Paid)

Debido a que ambos *Incoterms* representan el caso extremo de las diversas negociaciones comerciales en términos del lugar de entrega de las mercancías, que incluyen decisiones de transporte, así como los costes y responsabilidad de los agentes

logísticos (cliente y proveedor), se prevé que pequeñas variaciones pueden ser implementadas en el modelado para efecto de conocer el comportamiento del fenómeno bajo estudio para el caso de los *Incoterms* “intermedios” indicados en la figura 5.5.

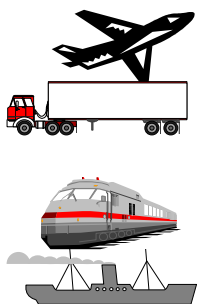
Cualquier modo de transporte, incluido el multimodal 	EXW	<i>Ex Works</i>	En fábrica (...lugar convenido)
	FCA	<i>Free Carrier</i>	Libre Transportista (...lugar convenido)
	CPT	<i>Carriage Paid To</i>	Transporte pagado hasta (...lugar de destino convenido)
	CIP	<i>Carriage and Insurance Paid To</i>	Transporte y seguro pagados hasta (...lugar de destino convenido)
	DAF	<i>Delivered at Frontier</i>	Entregada en frontera (lugar convenido)
	DDU	<i>Delivered Duty Unpaid</i>	Entregada derechos no pagados (...lugar de destino convenido)
	DDP	<i>Delivered Duty Paid</i>	Entregada derechos pagados (...lugar de destino convenido)

Figura 5.5
Incoterms que pueden ser modelados

Todos los costes incurridos en el proceso de transporte de las mercancías en el contexto internacional, presupone un efecto infalible en el precio final del producto, el cual influye de manera decisiva en la operatividad del esquema diseñado para la coordinación de inventarios. En definitiva, las actividades de traslado de la carga desde el punto de compra hasta el punto de consumo (o uso), agregan al producto ciertos costes logísticos que implican un análisis para la toma de decisiones. A manera de ejemplo, en la figura 5.6 se muestra el cambio que experimenta el precio de un producto según el tipo de *Incoterm*.

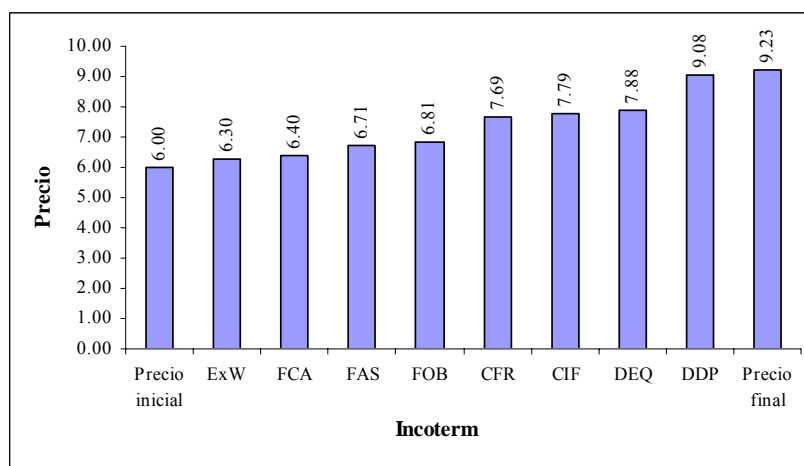


Figura 5.6
Ejemplo del cambio en el precio de un producto según el tipo de *Incoterm*

Fuente: Córdoba (2001).

En dicho gráfico, se observa que la diferencia del precio de venta de un producto en la planta del proveedor hasta que es puesto en venta es de 3.23 unidades monetarias (incluida la utilidad). Bajo un ambiente de negociación del *Incoterm* ExW, el precio del producto para el cliente es 30 céntimos más, los cuales cubren el coste por colocar el producto por parte del proveedor, en el transporte designado por el cliente. Para el caso del *Incoterm* DDP, el precio al cliente sufre un incremento de 3.08 unidades monetarias, los cuales cubre todos los gastos erogados por el proveedor por llevar el producto hasta el almacén del cliente.

5.4.5 El concepto de eficiencia de la combinación modal

Cuando se habla del nivel de eficiencia ofrecido por cada modo de transporte, desde el punto de vista del usuario, se hace referencia en cierta forma a la impedancia percibida por el tomador de decisiones, la cual involucra variables como: tiempo de espera, tiempo en tránsito, (vinculado con la velocidad y estado de los vehículos), confiabilidad, frecuencia, tarifas, pérdidas y daños, servicios adicionales (empaquete, documentación, seguimiento de la carga, acuerdos), etc. Algunos autores establecen que la tarifa (o coste de transporte sin utilidad, para el proveedor), es un reflejo de los atributos del servicio (Claramunt, *et al*, 1996; Duma, 1999).

La impedancia del transporte es un factor relacionado con la selección del tipo de transporte. Así, las diferentes alternativas para transportar mercancía conforman un conjunto de opciones con características exclusivas y con atributos especiales que subscriben distintos niveles de impedancia, a la que se le llamará también nivel de servicio. Por su parte, el tamaño del embarque en cada modo se especifica como una función de los atributos del modo, de la mercancía y del mercado (Claramunt, *et al*, 1996). Desde el punto de vista operativo, se observa la existencia de una relación recíproca entre estos dos elementos del sistema de inventario.

En la práctica, los atributos mencionados son considerados para medir la eficiencia del servicio de transporte, sin embargo, destaca la dificultad de medir la confiabilidad que el tomador de decisiones le otorga a cada modo en particular, la cual, se reconoce que tienen una gran influencia en el juicio de la elección del modo de transporte.

Por otro lado, es notable que la distancia no sea un factor de decisión, ya que este es un rasgo básico de la tarea de transporte que tiene que ser realizado de cualquier manera, es decir, no es un factor cuestionable, y generalmente actúa sin ninguna corrección (Duma, 1999). Este autor, establece que, el trabajo necesario (W_{mk}) que desarrolla un modo de transporte m en el tramo k está definido por la cantidad (Q_{imt}) de producto (i) a través del modo de transporte m en el periodo (t), multiplicado por el desplazamiento entre dos sitios (origen-destino, entre terminales, etcétera) que se encuentran a una distancia (d_k), es decir:

$$W_{mk} = Q_{imt} \times d_k \quad (5c.10)$$

Debido a que el tiempo en tránsito (t_{1k}) en el tramo k de la ruta, no está representado directamente con el trabajo de transporte, y dado que es una característica básica muy importante del servicio que actúa como un factor de resistencia al movimiento (impedancia), el desempeño de trabajo de transporte en tránsito (D_{TRA}), puede representarse como:

$$D_{TRA} = \frac{1}{\text{tiempo}} \text{Trabajo} = \frac{1}{t_{1k}} W_{mk} \quad (5c.11)$$

En donde,
$$D_{TRA} = \frac{1}{t_{1k}} (Q_{imt} \times d_k) = Q_{imt} \times V \quad (5c.12)$$

Por lo tanto, la decisión sobre la cantidad Q_{imt} de producto i que es enviado por el modo de transporte m está afectada por la velocidad de desplazamiento V de las mercancías por dicho modo, representando V , un elemento del nivel de servicio cuantificable, en términos de la rapidez con que se efectúa el trabajo de transporte.

Sin embargo, el procesamiento o manipulación de las mercancías en las sitios de trasbordo o transferencia, pueden causar un crecimiento de trabajo sin cubrir distancia alguna, tal y como se observa en la figura 5.11. En este sentido, se demuestra que el trabajo realizado no sólo está en función lineal de la distancia.

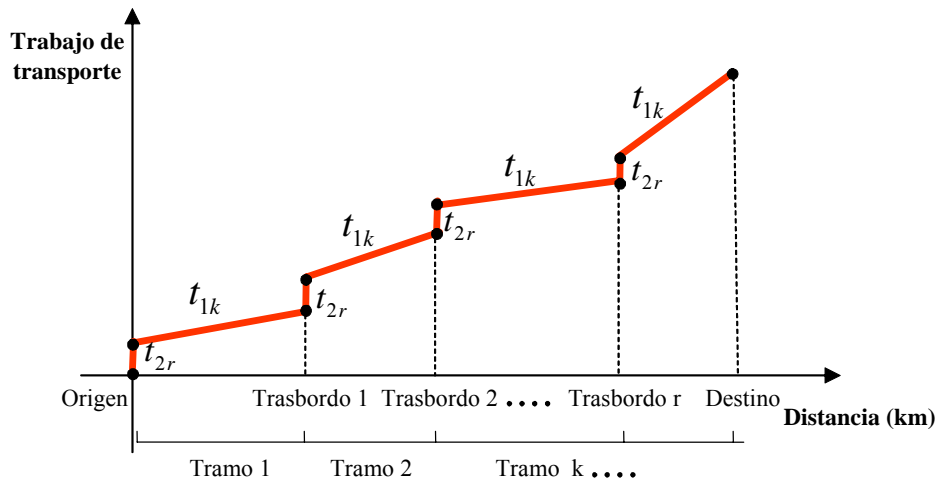


Figura 5.7
Función del trabajo de transporte

Fuente: Duma (1999).

En resumen, el desempeño del trabajo de transporte en sitios de transbordo o transferencia (D_{TRF}), es un factor adicional que se debe considerar, medido por el tiempo empleado (t_{2r}) en procesar la cantidad Q_{imt} de producto i que se mueve por el modo de transporte m en el período t en la terminal de transbordo r , definido como:

$$D_{TRF} = (1/t_{2r}) \cdot Q_{imt} \quad (5c.13)$$

Por lo anterior, el nivel de servicio del transporte (φ_m) del modo m de transporte para mover la cantidad Q_{imt} de producto i , está en función directa a la distancia d_k , e inversamente proporcional al tiempo total de desplazamiento agregado, compuesto por el tiempo en tránsito en el tramo k y el tiempo de procesamiento de la carga en el sitio de transbordo r , es decir:

$$\varphi_m = \frac{d_k}{t_{1k} + t_{2r}} \quad (5c.14)$$

De esta manera, se deriva la atracción relativa de cada modo de transporte y calibra la decisión del tomador de decisiones a la resistencia por seleccionar un modo de transporte.

5.4.6 Planteamiento del problema desde el punto de vista multicriterio

Los procesos de toma de decisiones se han visto analizados tradicionalmente con base en la definición de una función objetivo encargada de explicar el grado de

deseabilidad que tiene cada alternativa para el tomador de decisiones, y aquella alternativa que da el valor óptimo para dicha función, es seleccionada como la solución óptima. Sin embargo, se ha reconocido que dicho enfoque presenta un marco teórico con importantes debilidades, pues es rara la actividad en la que el ser humano no tenga que tomar decisiones con múltiples criterios en conflicto, y no a uno sólo.

En la vida real, raramente se toman decisiones atendiendo a un único criterio, y es más común intentar satisfacer varios objetivos diferentes a la vez que normalmente se encuentran en conflicto. Así por ejemplo, determinar la política de abasto más conveniente, es un objetivo común de las empresas para alcanzar una mayor eficiencia en la cadena de suministro. Entendiendo por eficiencia: cumplir con la demanda de los clientes, sin demoras y al menor coste. Hasta ahora, dicha política se ha limitado a la gestión de inventarios bajo un enfoque poco flexible canalizado hacia la determinación del tamaño del lote óptimo utilizando como único criterio el coste.

Para cumplir con este criterio, es común que los productos se muevan por los modos de transporte más económicos (“baratos”). Sin embargo, este enfoque continuamente se ve limitado debido a que el transporte utilizado resulta ser el menos eficiente, lento y de baja confiabilidad, es decir, con el peor nivel de servicio o tiempo de entrega; en consecuencia, el sistema se torna muy ineficiente.

Por otro lado, debido a que las actuales estrategias de gestión de inventarios, así como los sistemas de producción y ensamble de productos finales, actualmente se están exigiendo entregas a tiempo, cantidades suficientes y altos niveles de servicio que requieren de un esquema que responda a dichas demandas. Una respuesta extrema para satisfacer los tiempo de entrega sería la de disponer de grandes inventarios en un almacén o abastecer únicamente con modos de transporte rápidos (por ejemplo, el avión); evidentemente, esta propuesta podría resultar un tanto irracional para casos habituales dado el coste específico que ello representa.

Cabe señalar que el tema de la gestión de inventarios y del transporte, paulatinamente se ha venido estudiado en la literatura científica (véase capítulo 3), sin embargo, el tiempo de entrega no ha sido considerado de manera explícita por los autores que han trabajado el tema; en términos generales, dicho planteamientos ha sido

transformado en términos del coste. Ante este tipo de condiciones, la consideración evidente de un nuevo enfoque es requisito insoslayable de la competitividad.

En este sentido, el modelado multicriterio aporta la flexibilidad suficiente para lograr analizar el efecto de la toma de decisiones simultáneas sobre la política de inventarios y la elección del modo de transporte desde un punto de vista del nivel de servicio como sistema y no solo operativo (por ejemplo, número de entregas puntuales). Para ser más específicos el nivel de servicio en este contexto se asumen como el grado de impedancia que un centro de decisión experimenta para tomar la decisión por el uso de uno u otro modo o cadena de transporte.

En cierta forma, la impedancia de un modo de transporte, simplemente refleja el grado de resistencia que un tomador de decisiones percibe por seleccionar un modo en particular, en función de los atributos cuantitativos (tiempo de en tránsito, tiempo de espera, tarifas, daños o pérdidas, etc.) y cualitativos (confiabilidad, seguridad, servicios conexos, etc.).

A diferencia del enfoque basado en un solo criterio, el uso de un enfoque multicriterio permite obtener un cúmulo de posibles soluciones, de las cuales habrá que seleccionar aquella que cumpla con las expectativas de los tomadores de decisiones. En tal virtud, el estudio específico de los costes totales³, derivados de la política de abasto, y el uso combinado de diferentes modos de transporte reflejado en el nivel de servicio desde un punto vista sistémico, se convierte en una alternativa digna de análisis.

En la figura 5.8, se presenta un esquema hipotético sobre la interrelación de ambos criterios y su impacto sobre los costes del cliente. En el eje de las abscisas se indica el nivel de servicio del transporte (impedancia), mientras que en el eje de las ordenadas se indican los costes del proceso de suministro. Para efecto del análisis se asumen la siguientes simplificaciones: a) se considera que $(Ns_1 = Ns_3)$ y $(Ns_2 = Ns_4)$; y b) los diferentes tipos de costes (máximos y mínimos) se han colocado al mismo nivel, pero bien pueden ser distintos para un caso real.

³ El concepto de coste total es uno de los instrumentos más importantes en la gestión de la cadena de suministro, y su propósito es crear un flujo eficiente de materiales por medio de la definición de un balance óptimo entre nivel de servicio y bajos costes logísticos. Los principales costes involucrados en el proceso logístico son: almacenaje, procesamiento de órdenes e información, cantidades producidas u ordenadas, inventario y transporte.

En el cuadrante I se analizan los criterios de estudio; es decir, la curva que muestra el intercambio (*tradeoff*) entre el coste total de la gestión del sistema de inventarios *versus* nivel de servicio del transporte. En el cuadrante II, se analiza el coste en el que incurre el cliente por lanzar órdenes. La curva en el cuadrante III, muestra el desarrollo de los costes por almacenar productos en el local del cliente, mientras que en el IV se representan los costes por inventario en tránsito.

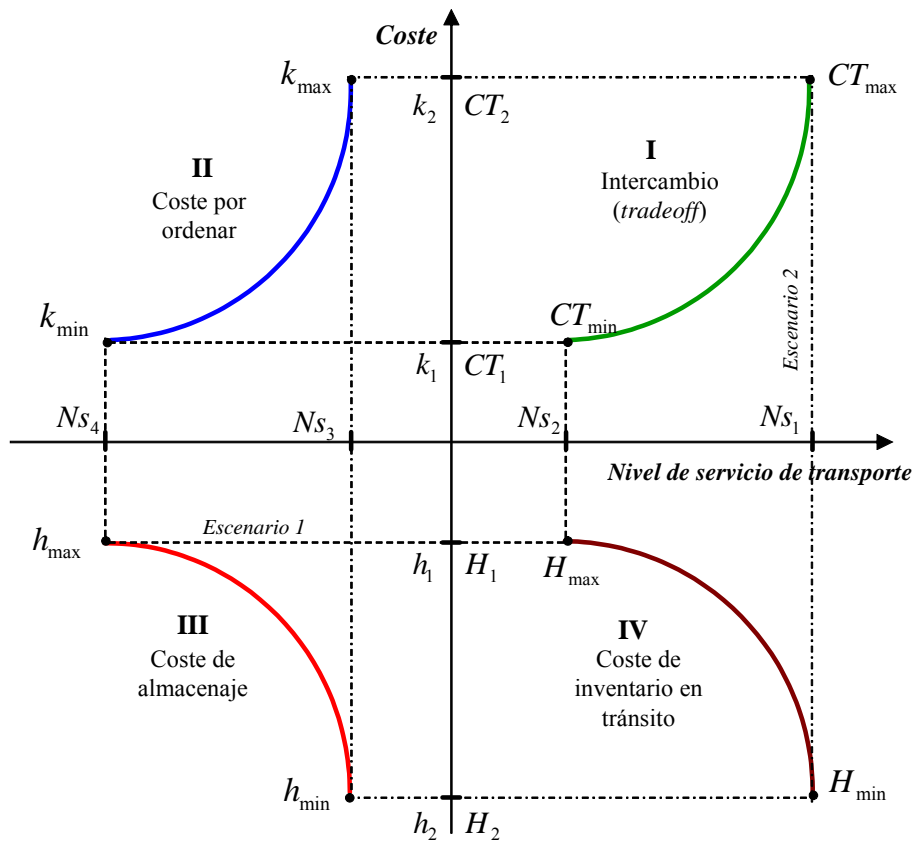


Figura 5.8
Esquema de interrelación de los criterios coste y nivel de servicio del transporte y su impacto en los costes relevantes del cliente

En un primer escenario, un cliente puede lograr el coste total mínimo (CT_1) con el uso del modo de transporte más lento y barato (por ejemplo, el barco) para mover sus productos que adquiere, planificando períodos de abasto más largos. Sin embargo, por las condiciones de operación de este modo de transporte (baja frecuencia de servicio, grandes volúmenes de carga y tiempos de entrega muy grandes) obtendrá el peor nivel de servicio (NS_2); como consecuencia, esta decisión le generará un alto coste de inventario en tránsito (H_1), y se verá en la necesidad de mantener ciertas cantidades de inventario en almacén, que se verá reflejado en un mayor coste (h_1) por este concepto;

esto último, con la intención de solventar los riesgos que conlleva este tipo de modo de transporte (N_{s_4}). Ciertamente, el cliente puede lograr un menor coste por lanzar un menor número de órdenes (k_1). El proveedor en este caso, se verá beneficiado por el envío de lotes grandes, reduciendo su coste fijo por procesar un menor número de pedidos del cliente.

Con el uso de modos de transporte más rápidos (por ejemplo, el avión), en un segundo escenario las consecuencias serían “contrarias” al caso anterior. Es decir, el cliente podría lograr el máximo nivel de servicio (N_{s_1}), principalmente porque mejora sustancialmente el tiempo de entrega con modos de transporte más rápidos, pero con el peor el coste de transporte (CT_1) derivado de tarifas más elevadas y porque lanza órdenes más frecuentes y pequeñas a un coste (k_2) al nivel de servicio (N_{s_3}). Con esto, podría lograr el coste mínimo de productos en almacén (h_2) y de inventario en tránsito (H_2) debido a la velocidad de entrega de este modo de transporte. Para el cliente, este esquema le genera la ventaja de pedir su lote económico óptimo, lo cual podría implicar mayores costes fijos al proveedor por concepto de un aumento en el número de órdenes procesadas.

De esta manera, el problema reside en buscar el menor coste total en la gestión de inventarios, lo que implica necesariamente establecer ciertas condiciones logísticas y de coordinación que permitan al mismo tiempo maximizar el desempeño del servicio de transporte. Como es evidente, se observa claramente la necesidad de compensar (*tradeoff*) un objetivo a favor del otro - coste *versus* nivel de servicio de transporte- La búsqueda de un menor coste en la gestión de los inventarios implica determinar el sacrificio de nivel de servicio de transporte que se estaría dispuesto a incurrir; y viceversa.

Es importante destacar que, cuando existen múltiples criterios que compiten entre sí, y que son importantes, no existe una solución única la cual simultáneamente optimice todos los objetivos. El resultado se convierte en un conjunto de soluciones óptimas con una variación gradual de los valores de los objetivos. Por fortuna existen muchas otras soluciones compromiso que pueden facilitar la toma de decisiones (en la figura, son soluciones todos los puntos que forman la curva en el cuadrante I). Al respecto, clientes y proveedores podrán definir su posición sobre los criterios ya

mencionados. En otras palabras, el tomador de decisiones tendrá la oportunidad de evaluar su función de utilidad a partir de la preferencia que otorgue a uno u otro criterio. Conferir mayor importancia al nivel de servicio de transporte, implica que sacrificará cierto coste por su decisión.

Por lo anterior, y para el caso específico de esta tesis, puede concretarse que la gestión de inventarios posee una orientación multicriterio en donde no sólo está enfocada ha optimizar el tamaño del lote de abastecimiento, sino también la combinación más apropiada de los modos de transporte que ofrezcan el mayor nivel de servicio al menor coste.

5.5 Formulación de los modelos para la coordinación de inventarios utilizando la estrategia ECR

Con base en el análisis y planteamiento del problema de los apartados anteriores, y de acuerdo con la formulación de las preguntas de investigación establecida en el capítulo 1, en esta sección se presenta el desarrollo y las consideraciones hechas para la formulación de dos modelos que buscan fundamentar la interrelación de los criterios identificados en el contexto de negociación ExW y DDP.

Los modelos presentados para la coordinación de inventario extienden el desarrollado por Reyes y Gaytán (2003), pero ahora considerando de manera explícita el nivel de servicio de transporte para la elección del modo, considerado como un criterio adicional para facilitar la toma de decisiones coordinadas de las cantidades a ordenar, los períodos de entrega y el modo de transporte a utilizar. Este nuevo planteamiento conforma un modelo de optimización multicriterio, el cual tiene en cuenta dos objetivos fundamentales. El primero, relacionado con la minimización del coste total de suministro que incluye los costes de inventario y de transporte. El segundo, relacionado con la maximización del nivel de servicio que ofrece cada modo de transporte y que se emplea para el traslado de los productos.

Para el desarrollo y exposición de esta sección, se ha dividido en dos partes. En la primera se presenta el modelo semántico y las características principales que lo distinguen. En la segunda, se presenta el desarrollo del modelo matemático propiamente dicho.

5.5.1 Modelo semántico

El estudio por segmentos o descomposición de la cadena de suministro es una buena alternativa para definir políticas adecuadas de coordinación (véase figura 2.9, capítulo 2). Por esta razón, para el modelado de la coordinación de los inventarios, se representa la cadena de abastecimiento en su estructura básica conformada por un proveedor que abastece diferentes productos a un cliente, utilizando diversos modos o cadenas de transporte en un horizonte de planeación finito. El objetivo es determinar el tamaño del lote (Q_{im}) óptimo por cada modo de transporte, que minimice el coste total y maximice el nivel de servicio (véase figura 5.8).

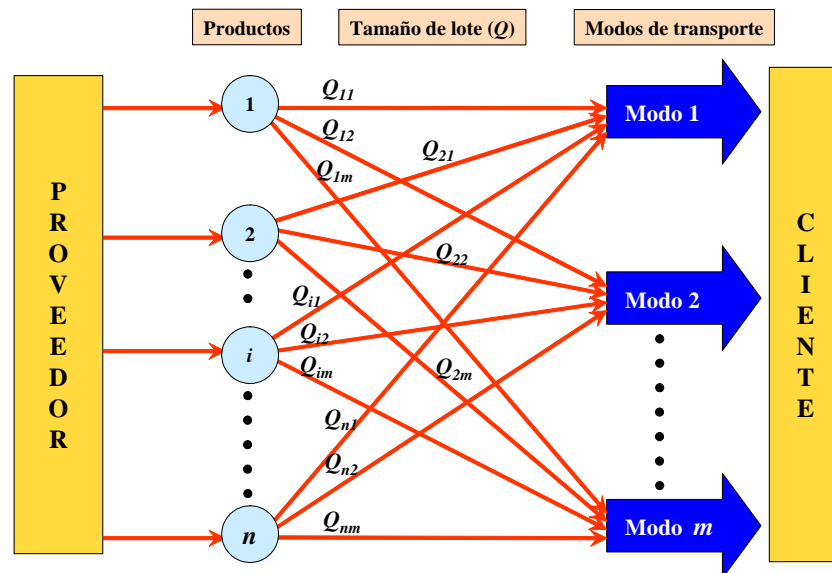


Figura 5.9
Modelo semántico: estructura básica de la cadena de suministro modelada para un período t dado

Dentro de los mecanismos de coordinación de inventarios existen estrategias basadas en los tiempos de resurtido, otras orientadas a cantidades y recientemente se han propuesto políticas híbridas (Centinkaya, *et al*, 2006). En este trabajo se implementa una estrategia de coordinación basada en tiempo, llamada *Épocas Comunes de Resurtido* (ECR) (Viswanathan y Piplani, 2001). En el contexto de dicha estrategia, el problema busca abastecer “ n ” productos en períodos fijos de planeación, y lograr ahorros ($S\%$) sobre el coste óptimo de la política no coordinada del cliente. Se enfatiza que el proveedor incurre en un coste fijo por atender cada orden del cliente, y en un coste por abastecer cada producto que se incluye en el pedido. Debido a que el

proveedor conoce los costes y los parámetros de la demanda de su cliente, puede anticipar su reacción y tomar una decisión óptima.

Al definir la estrategia se evalúa la conveniencia de surtir los productos bajo los *Incoterm*: EXW (*Ex Works*) y DDP (*Delivery Duty Paid*), y se elige el modo de transporte para los bienes. Como medidas de desempeño se consideran los costes totales (inventarios en almacén y en tránsito, fletes y coste de resurtido), y el nivel de servicio.⁴

El modelo considera como principales variables de decisión el número base de períodos entre resurtidos, y el descuento que debe dar el proveedor al cliente, el cual asegura que al pedir éste en períodos específicos, se compense el coste extra por usar la política *ECR*, e inclusive se proporcione un descuento adicional sobre la política no coordinada. Así como descuentos de las tarifas de transporte de acuerdo a las cantidades de producto definidas por la política de inventario (nivel de inventario y cantidad óptima de la orden). Permitiendo además, ayudar a la toma de decisiones sobre el nivel de servicio de transporte y del tipo de negociación del comercio internacional.

Para el caso del proveedor, se busca que el modelo minimice los costes por: *i*) procesar cada orden lanzada por el cliente (*set up*); *ii*) por atender el conjunto de órdenes de los *n* productos solicitados por el cliente; *iii*) asumir el descuento aplicado al producto; *iv*) asumir el descuento aplicado al transporte; y *v*) maximizar el nivel de servicio del transporte. Estos dos últimos para el caso del *Incoterm DDP*.

Para el caso del cliente, se busca que el modelo minimice los costes por: *i*) lanzar órdenes; *ii*) almacenar productos; *iii*) inventario en tránsito; *iv*) de transporte; y *v*) maximizar el nivel de servicio del transporte, estos dos último para el caso del *Incoterm ExW*.

A partir del planteamiento del problema para la coordinación de inventarios cliente-proveedor en el contexto antes descrito, surgen nuevos cuestionamientos de gran importancia que complementan a las preguntas de investigación y que se tendrán que

⁴ Cabe recordar que el *Incoterm Ex Work*, establece la entrega de mercancías en la fábrica del proveedor (EXW, por sus siglas en inglés), mientras que el segundo, contempla la entrega de los productos con derechos pagados en la planta del cliente, denominado *Delivered Duty Paid (DDP)*, por sus siglas en inglés).

responder, por ejemplo, ¿Cuál deberá ser la política de inventario y de transporte?, es decir, ¿Cuándo y cuántas ordenes debe lanzar el cliente durante el horizonte de planeación que minimicen los costes conjuntos?, ¿Cuál es el tamaño de la orden por tipo de producto en cada período?, ¿Qué modo de transporte se debe usar para enviar sus productos, de tal forma que cumpla con el mínimo coste y los tiempos de entrega?, ¿Qué cantidad y qué tipo de producto debe enviar por cada una de las combinaciones modales de transporte posibles?, ¿El descuento en las tarifas de transporte y en el precio del producto podría ser un mecanismo de coordinación de inventarios y de modos de transporte para que el cliente o proveedor tomen la decisión de coordinarse?, y ¿Qué tipo de *Incoterm* deberán emplear las empresas para efecto de mantener un equilibrio en los costes totales de ambas partes?

5.5.2 Formulación matemática de los modelos

A partir del modelo semántico y los cuestionamientos expresados, en esta sección se presentan los supuestos y el desarrollo detallado de la formulación matemática del problema multicriterio para la coordinación de inventarios.

5.5.2.1 Supuestos

El modelado de los *Incoterms* (*EXW* y *DDP*) involucrados en el análisis, se toma en cuenta los siguientes supuestos generales:

Para el cliente:

- Experimenta una demanda determinista y dinámica. El cliente demanda una cantidad conocida variable de diferentes productos, durante un horizonte finito de T períodos.
- Incurrir en costes por mantener inventario y por generar cada orden de compra.
- Debido a que la demanda es determinista, los tiempos de entrega (*lead times*) de los productos están en función del modo de transporte empleado, definiéndose el esquema de planeación mostrado en la figura 5.10. En dicha figura, se establece que los pedidos que son lanzados al inicio del período t , pueden ser entregados al término de este período (t), al final del segundo ($t+1$) y tercer período ($t+2$), haciendo uso de los modos de transporte rápido, medio y lento, respectivamente.

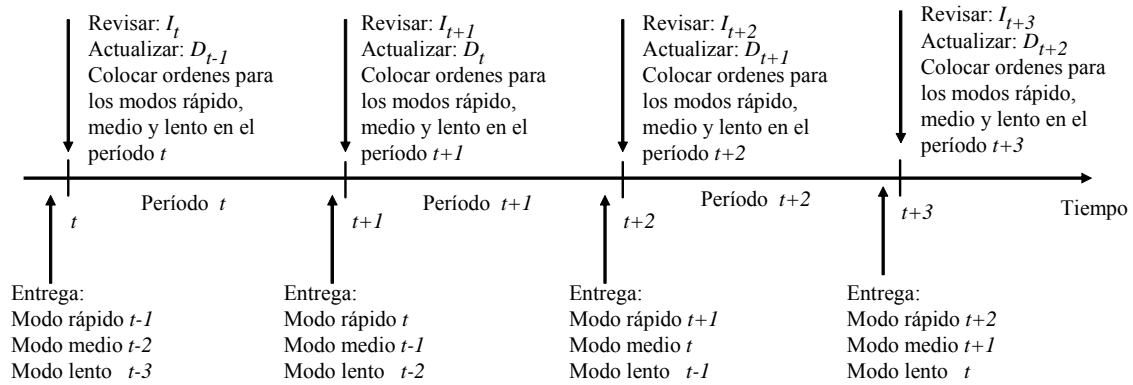


Figura 5.10
Tiempo de ciclo y decisiones de ordenar

Fuente: adaptado de Sethi, *et al.* (2005).

Otra manera de ver este plan, específica que los pedidos que llegan en el periodo actual t , son lanzados en $t - m$ periodos antes (véase figura 5.11).

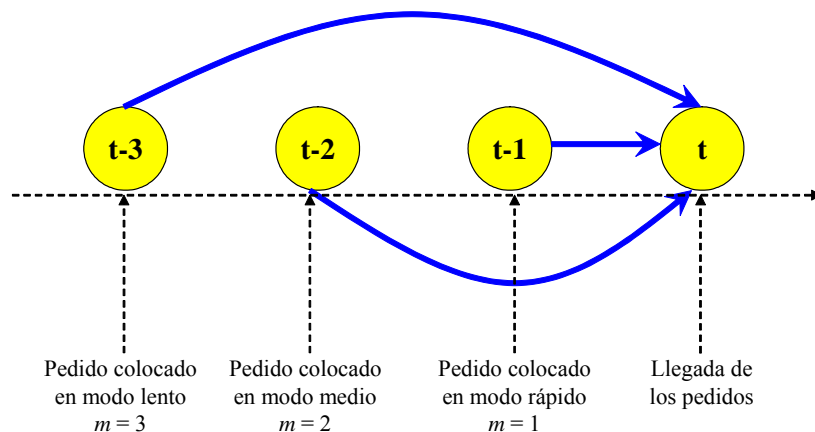


Figura 5.11
Pedidos lanzados en $t-m$ periodos antes

- El cliente ordena la cantidad Q_{imt} del producto i al inicio del periodo t a través del modo m , $\forall i = 1, \dots, n; m = 1, \dots, M; t = 1, \dots, T(m)$.
- El inventario sobrante al final del periodo t del periodo del producto i está dado por I_{it} , $\forall i = 1, \dots, n; t = 1, \dots, T(m)$.
- No se permiten faltantes, y el inventario al inicio y al final del horizonte de planeación es cero.

Sin coordinación *ECR*, el cliente lanza órdenes en los periodos y en las cantidades de acuerdo a su política óptima, con la ayuda de algún método exacto, como el de Wagner y Whitin (1958).

Para el proveedor

- Vende varios productos al cliente.
- Sin coordinación *ECR*, el proveedor incurre en un coste fijo total ($A_s + A_i$) por procesar cada orden del cliente A_s y A_i si el producto i está incluido. Con coordinación, incurre en un coste A_i por cada orden procesada del producto i , más un coste A_s por procesar un conjunto de órdenes, cada T_0 periodos (siempre y cuando el cliente haya hecho un pedido).
- Conoce la demanda de cada cliente, sus costes por ordenar y por mantener inventario; por lo tanto, puede determinar para un tiempo base T_0 en particular, los periodos en los que el cliente debe ordenar para minimizar sus costes. Como consecuencia, tiene la posibilidad de determinar el descuento mínimo z_{1i} sobre el precio de los productos v_i , para que cada cliente acepte la estrategia *ECR*.
- De igual manera, para el caso de una estrategia de comercialización del tipo DDP el proveedor cuenta con la posibilidad de distribuir los volúmenes de productos por diferentes modos de transporte. Ello, le permite negociar mejores tarifas de transporte y ofrecer un descuento adicional z_{2m} sobre el coste del transporte. Para el caso del *Incoterm ExWork*, lo anterior no es factible debido a que el cliente cubre cabalmente el coste total de transporte y corresponde a éste llevar a cabo las negociaciones específicas.
- Por lo anterior, en el contexto del *Incoterm DDP* y debido al ahorro en los costes de inventario y de transporte, al proveedor le permite compensar al cliente el incremento de los costes por usar la política *ECR*, por medio de un ahorro de $S_1\%$ sobre el coste total del inventario y un ahorro adicional de $S_2\%$ sobre el coste de transporte si no usara la coordinación *ECR*, y además decidiera el cliente negociar sobre la base de éste *Incoterm*.

5.5.2.2 Notación empleada en la formulación matemática

Para el cliente y cada período $t \in \{1, \dots, T(m)\}$ se define lo siguiente.

5.5.2.2.1 Parámetros del modelo

- n = Número de productos
- M = Total de número de modos de transporte
- m = Modo de transporte (o cadena de transporte)
- $T(m)$ = Número de períodos del horizonte de tiempo en función del modo de transporte (m). Para $m = 1, t = 1, \dots, T$; $m = 2, t = 1, \dots, T - 1$; $m = 3, t = 1, \dots, T - 2$
- k_{imt} = Coste que incurre el cliente por ordenar el producto i por el modo m en el período t
- h_i = Coste del cliente por mantener inventario durante un período, una unidad de \$ del producto i [dado en, \$/(\$/período)]
- H_{im} = Coste del cliente por mantener inventario en tránsito por el modo de transporte m , una unidad de \$ del producto i [dado en, \$/(unidad/período)]
- D_{it} = Demanda del cliente del producto i en el período t [en unidades/período]
- v_i = Coste unitario del producto i [dado en, \$/unidad]
- A_s = Coste fijo para el proveedor por procesar una orden del cliente
- A_i = Coste fijo para el proveedor por procesar una orden del producto i
- T_0 = Número base de períodos entre resurtidos, tal que $T_0 \in \Omega$
- Ω = Conjunto de valores posibles para el número base de períodos entre resurtidos T_0 , tal que $\Omega = \{x \mid 2 \leq x \leq T(m), x \text{ entero}\}$
- τ_m = Tarifa de transporte del modo m , independiente del volumen
- S_1 = Ahorro para el cliente sobre el coste total de no usar la coordinación *ECR* [dado en %]
- S_2 = Ahorro en la tarifa de transporte para el cliente sobre el coste total de no usar la coordinación *ECR* y negociar sobre la base del *Incoterm DDP* [dado en %]
- R_{imt} = Constante positiva elegida adecuadamente
- ϕ_m = Denota el factor de impedancia o desempeño del modo de transporte m que percibe el tomador de decisiones, definido por la rapidez con que se realiza el trabajo de trasladar mercancías entre el origen y su destino final (incluye el tiempo en terminales intermodales de carga)

5.5.2.2.2 Variables de decisión

- I_{it} = Inventario del producto i al final del período t [dado en, unidades/período]
- Q_{imt} = Cantidad ordenada por el cliente del producto i para ser surtida por el modo m al inicio del período t , $\forall i = 1, \dots, n; m = 1, \dots, M; t = 1, \dots, T(m)$ [dada en, unidades/período].

z_{1i} = Descuento dado por el proveedor al cliente, para compensar el incremento en el coste por usar la estrategia *ECR* sobre el producto i , y además proporcionar un ahorro igual a $S_1\%$ sobre el coste total sin coordinación.

z_{2m} = Descuento adicional por lograr una mejor negociación de las tarifa de transporte (τ_m) para el total de mercancías que se mueven por el modo de transporte m y además proporcionar un ahorro igual a $S_2\%$ sobre el coste total de transporte sin coordinación en el contexto del *Incoterm* DDP.

$$Y_{imt} = \begin{cases} 1, & \text{si } Q_{imt} > 0 \text{ para } t = 1, \dots, T(m) \\ 0, & \text{de otra manera} \end{cases}$$

5.5.3 Formulación del problema sin coordinación

Para llevar a cabo el modelado del problema y su evaluación, se ha estimado conveniente desarrollar un primer modelo que permita determinar los valores de los criterios involucrados para el caso de que no exista una política coordinada de los inventarios. Esto es, en ausencia de una política coordinada, el cliente adquiere sus productos de acuerdo a su política óptima individual determinado por el modelo bicriterio no coordinado (*MMNC*) siguiente:

(*MMNC*)

$$\text{Min } g_{li}^{nC} = \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T k_{imt} Y_{imt} + \sum_{t=1}^T h_i I_{it} + \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T H_{im} Q_{imt} + \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T \tau_m Q_{imt} \quad (5c.1)$$

$$\text{Max } g_{li}^{ef} = \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T \varphi_m Q_{imt} \quad i = 1, \dots, n; \quad t = 1, \dots, T(m) \quad (5c.2)$$

Sujeto a:

$$I_{it} = I_{i,t-1} + \sum_{m=1}^M Q_{im,t-m+1} - D_{it} \quad i = 1, \dots, n; \quad t = 1, \dots, T(m) \quad (5c.3)$$

$$Q_{imt} \leq R_{imt} Y_{imt} \quad \text{con } R_{imt} = \sum_{t=1}^T D_{it} \quad i = 1, \dots, n; \quad m = 1, \dots, M; \quad t = 1, \dots, T(m) \quad (5c.4)$$

$$I_{i,0} = 0 \quad i = 1, \dots, n \quad (5c.5)$$

$$Y_{imt} \in \{0, 1\} \quad i = 1, \dots, n; \quad m = 1, \dots, M; \quad t = 1, \dots, T(m) \quad (5c.6)$$

$$I_{it}, Q_{imt} \geq 0 \quad \text{entero} \quad i = 1, \dots, n; \quad t = 1, \dots, T(m) \quad (5c.7)$$

A partir de este modelo, se deriva el coste fijo del cliente por ordenar el producto i por el modo m en el período t .

$$g_i^{pnC} = \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T k_{imt} Y_{imt} + \sum_{t=1}^T h_i I_{it} \quad i = 1, \dots, n \quad (5c.8)$$

Y su coste de transporte por mover el producto i por el modo m

$$g_{2m}^{nC} = \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T \tau_m Q_{imt} \quad m = 1, \dots, M \quad (5c.9)$$

El modelo se encuentra inmerso en el contexto de los llamados modelos multicriterio (multiobjetivo) y busca minimizar los costes totales del cliente (g_{li}^{nC}), y a la vez, maximizar la eficiencia (g_{li}^{ef}) combinada de diversos modos de transporte para cubrir las expectativas de su demanda. Así, el primer criterio (ecuación 5.1), relacionado con la minimización del coste total de inventario y transporte, involucra el coste por ordenar, el coste por almacenar los productos, el coste del inventario en tránsito por modo de transporte y el coste mismo de transporte (tarifa). Cabe señalar que el coste por comprar se asume como un coste que permanece constante a lo largo del período de estudio y que éste no cambia para el caso de un ambiente coordinado.

El segundo criterio (ecuación 5c.2), está relacionado con la eficiencia del transporte, y trata de motivar el uso del modo más adecuado para el traslado de los productos, de acuerdo con su nivel de desempeño o grado de impedancia percibido por el tomador de decisiones.

La restricción (5c.3) constituye una ecuación de balance de inventarios, la cual explica que la cantidad de inventario al final del período actual es igual al inventario final del período inmediato anterior, más la cantidad abastecida por el proveedor, utilizando diferentes modos de transporte en el período actual, menos la demanda experimentada por el cliente. La condición (5c.4) asegura que el cliente incurrirá en un coste al ordenar sólo cuando pidan el producto i por el modo m en el período t . La (5c.5) inicializa los inventarios a cero al comienzo del horizonte de planeación. Las restricciones (5c.6) y (5c.7) especifican los tipos de variables.

Sin usar la política *ECR*, el proveedor incurre en un coste A_s por procesar cada orden de su cliente, y en un coste A_i si el producto i es incluido en la orden. De esta manera, el coste por procesar todas las órdenes de compra del cliente y de los “ n ” productos durante un horizonte de T periodos es:

$$g_0^{nC} = \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T A_s X_{it} + \sum_{i=1}^n A_i Y_{imt} \quad (5c.15)$$

Siendo los valores de las variables X_{it} correspondientes a la solución del modelo *MMNC*. En tal virtud:

$$X_{it} = \begin{cases} 1, & \text{si } \sum_{m=1}^M Y_{imt} > 0 \quad \text{para } t = 1, \dots, T(m) \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}$$

$M_1, M_2 =$ Constantes positivas elegidas adecuadamente

5.5.4 Formulación del problema coordinado en el contexto del *incoterm* ExW

Considerando ahora que el cliente y el proveedor asumen la estrategia *ECR* para coordinar sus inventarios. El cliente, en este caso, sólo podrá realiza sus pedidos al proveedor en múltiplos del período base. Sin embargo, si no le conviene, el cliente queda en libertad de no lanzar el pedido en algún período. Asumiendo que la demanda del premier período es positiva para el cliente, a partir de éste podrá realizar sus pedidos de compra solamente cada cierto múltiplo de T_0 de tal forma que se minimicen los costes totales del sistema. Formalmente los pedidos del cliente pueden ocurrir en los periodos:

$$\{1, 1+T_0, 1+2T_0, \dots, 1+\alpha T_0\} \quad \text{siendo } \alpha = \left\lfloor \frac{T(m)-1}{T_0} \right\rfloor \quad (5c.16)$$

Bajo el contexto del *Incoterm* ExWork, el mínimo coste total para el proveedor utilizando la estrategia *ECR* y el máximo valor de la eficiencia global de transporte, durante el horizonte finito de T periodos, está dado por el siguiente modelo bicriterio de optimización lineal entera:

(MMC-ExW)

$$\text{Min } g_0^{\text{CoExW}} = \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T A_S X_{it} + \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T A_i Y_{imt} + \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T D_{it} v_i z_{1i} \quad (5c.17)$$

$$\text{Max } g_0^{\text{efExW}} = \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T \varphi_m Q_{imt} \quad (5c.18)$$

Sujeto a:

$$\sum_{t=1}^T D_{it} v_i z_{1i} = \left[\left(\sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T k_{imt} Y_{imt} + \sum_{t=1}^T h_i I_{it} \right) - g_i^{\text{pnC}} (1 - S_1) \right] \quad i = 1, \dots, n \quad (5c.19)$$

$$I_{it} = I_{i,t-1} + \sum_{m=1}^M Q_{im,t-m+1} - D_{it} \quad i = 1, \dots, n; \quad t = 1, \dots, T(m) \quad (5c.20)$$

$$Q_{imt} \leq R_{imt} Y_{imt} \quad \text{con } R_{imt} = \sum_{t=1}^T D_{it} \quad i = 1, \dots, n; \quad m = 1, \dots, M; \quad t = 1, \dots, T(m) \quad (5c.21)$$

$$I_{i,0} = 0 \quad i = 1, \dots, n \quad (5c.22)$$

$$Y_{imt} = 0 \quad i = 1, \dots, n; \quad t \neq \{1, 1+T_0, 1+2T_0, \dots, 1+\alpha T_0\} \quad (5c.23)$$

$$\text{siendo} \quad \alpha = \left\lfloor \frac{T(m)-1}{T_0} \right\rfloor; \quad m = 1, \dots, M; \quad t = 1, \dots, T(m)$$

$$\sum_{m=1}^M Y_{imt} \leq M_1 X_{it} \quad \text{con } M_1 = n \quad i = 1, \dots, n; \quad t = 1, \dots, T(m) \quad (5c.24)$$

$$Y_{imt}, X_{it} \in \{0, 1\} \quad i = 1, \dots, n; \quad m = 1, \dots, M; \quad t = 1, \dots, T(m) \quad (5c.25)$$

$$I_{it}, Q_{imt} \geq 0 \quad \text{entero} \quad i = 1, \dots, n; \quad m = 1, \dots, M; \quad t = 1, \dots, T(m) \quad (5c.26)$$

$$z_{1i} \geq 0 \quad i = 1, \dots, n \quad (5c.27)$$

$T_0 \in \Omega$ donde Ω está formado por elementos del conjunto:

$$\{x \mid 2 \leq x \leq T(m), \text{ entero}\} \quad (5c.28)$$

La función (5c.17) representa el coste mínimo del proveedor, el cual incurre por atender el pedido del cliente y de los productos en particular solicitados por éste, así como los costes que debe absorber por compensar el hecho de que el cliente aceptó la estrategia *ECR*. La función (5c.18) representa la eficiencia global de transporte por el uso combinado de diferentes modos.

La restricción (5c.19) garantiza que el descuento z_{1i} aplicado a cada uno de los productos, compensa con un ahorro $S_1\%$ sobre el coste g_i^{pnC} , el incremento por tener

más inventario y/o generar más ordenas de compra al no pedir con base a su política individual. (5c.20) constituye una ecuación de balance de inventarios. La restricción (5c.21) asegura que el cliente incurrirá en un coste por ordenar solamente cuando ordene una o más unidades del producto i . La (5c.22) inicializa los inventarios a cero al inicio del período de planeación. La condición (5c.23) garantiza que no se generen ordenes de compra en períodos que no son múltiplos de T_0 . La (5c.24) asegura que si en cierto período se realiza al menos un pedido, el proveedor incurre en un coste fijo A_s por procesar un conjunto de órdenes. Las restricciones (5c.25, 5c.26, 5c.27 y 5c.28) indican el tipo de variables del modelo. La (5c.28) asegura que los valores de T_0 corresponde a un conjunto de unidades predefinido por el proveedor.

5.5.5 Modelado de la coordinación “Épocas Comunes de Resurtido” (ECR)

Una manera de modelar la condición (24) es introduciendo una variable binaria P_{T_0} , tal que:

$$P_{T_0} = \begin{cases} 0 & \text{si } Y_{imt} = 0 \text{ para } t \neq \{1, 1+T_0, 1+2T_0, \dots, 1+\alpha T_0\} \text{ siendo } \alpha = \left\lfloor \frac{T(m)-1}{T_0} \right\rfloor \\ 1 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (5c.29)$$

$$i = 1, \dots, n; m = 1, \dots, M; t = 1, \dots, T(m); T_0 \in \Omega$$

Para lograr (23), se debe cumplir que:

$$\sum_{k=2}^{T_0} Y_{imk} + \sum_{k=T_0+2}^{2T_0} Y_{imk} + \sum_{k=2T_0+2}^{3T_0} Y_{imk} + \dots + \sum_{k=rT_0+2}^w Y_{imk} \leq P_{T_0} M_2 \quad i = 1, \dots, n; m = 1, \dots, M; T_0 \in \Omega \quad (5c.30)$$

$$\text{con } M_2 = T - 1, \quad r = \left\lfloor \frac{T(m)-2}{T_0} \right\rfloor, \quad w = \min \{(r+1)T_0, T(m)\}$$

$$\sum_{T_0 \in \Omega} P_{T_0} = (H - 1) \quad \text{en donde } H \text{ es igual al número de elementos de } \Omega \quad (5c.31)$$

$$P_{T_0} \in \{0, 1\} \quad T_0 \in \Omega \quad (5c.32)$$

Para resolver el modelo anterior, las restricciones 5c.30, 5c.31 y 5c.32 son utilizadas en lugar de la restricción (5c.23). Es importante señalar que la restricción (5c.31) puede deducirse que el valor de T_0 que el modelo (5c.17)-(5c.32) arroje como el óptimo, será aquel para el cual $P_{T_0} = 0$.

El modelo completo, ya modificado, queda como se presenta a continuación (véase, ⁵):

(MMC-ExW-1)

$$\text{Min } g_0^{\text{CoExW}} = \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T A_S X_{it} + \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T A_i Y_{imt} + \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T D_{it} v_i z_{1i} \quad (5c.17)$$

$$\text{Max } g_0^{\text{efExW}} = \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T \varphi_m Q_{imt} \quad (5c.18)$$

Sujeto a:

$$\sum_{t=1}^T D_{it} v_i z_{1i} = \left[\left(\sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T k_{imt} Y_{imt} + \sum_{t=1}^T h_i I_{it} \right) - g_i^{\text{pnC}} (1 - S_1) \right] \quad i = 1, \dots, n \quad (5c.19)$$

$$I_{it} = I_{i,t-1} + \sum_{m=1}^M Q_{im,t-m+1} - D_{it} \quad i = 1, \dots, n; \quad t = 1, \dots, T(m) \quad (5c.20)$$

$$Q_{imt} \leq R_{imt} Y_{imt} \quad \text{con } R_{imt} = \sum_{t=1}^T D_{it} \quad i = 1, \dots, n; \quad m = 1, \dots, M; \quad t = 1, \dots, T(m) \quad (5c.21)$$

$$I_{i,0} = 0 \quad i = 1, \dots, n \quad (5c.22)$$

$$\sum_{k=2}^{T_0} Y_{imk} + \sum_{k=T_0+2}^{2T_0} Y_{imk} + \sum_{k=2T_0+2}^{3T_0} Y_{imk} + \dots + \sum_{k=rT_0+2}^w Y_{imk} \leq P_{T_0} M_2 \quad (5c.30)$$

$i = 1, \dots, n; \quad m = 1, \dots, M; \quad T_0 \in \Omega$

$$\text{con } M_2 = T - 1, \quad r = \left\lfloor \frac{T(m) - 2}{T_0} \right\rfloor, \quad w = \min \{ (r+1)T_0, T(m) \}$$

$$\sum_{T_0 \in \Omega} P_{T_0} = (H - 1) \quad \text{en donde } H \text{ es igual al número de elementos de } \Omega \quad (5c.31)$$

$$P_{T_0} \in \{0, 1\} \quad T_0 \in \Omega \quad (5c.32)$$

$$\sum_{m=1}^M Y_{imt} \leq M_1 X_{it} \quad \text{con } M_1 = n \quad i = 1, \dots, n; \quad t = 1, \dots, T(m) \quad (5c.24)$$

$$Y_{imt}, X_{it} \in \{0, 1\} \quad i = 1, \dots, n; \quad m = 1, \dots, M; \quad t = 1, \dots, T(m) \quad (5c.25)$$

$$I_{it}, Q_{imt} \geq 0 \quad \text{entero} \quad i = 1, \dots, n; \quad m = 1, \dots, M; \quad t = 1, \dots, T(m) \quad (5c.26)$$

$$z_{1i} \geq 0 \quad i = 1, \dots, n \quad (5c.27)$$

$$T_0 \in \Omega \quad \text{donde } \Omega \text{ está formado por elementos del conjunto:} \quad (5c.28)$$

$$\{x \mid 2 \leq x \leq T(m), \text{ entero}\}$$

⁵ Por respetar el número original en la formulación de la ecuación, la secuencia aparece discontinua en este problema modificado.

El coste g_1^{CoExW} del cliente utilizando la estrategia *ECR*, se obtiene a partir de la solución del modelo (5c.17)-(5c.32), usando la siguiente expresión:

$$g_1^{CoExW} = \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T k_{imt} Y_{imt} + \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T h_i I_{it} - \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T D_{it} v_i z_{1i} + \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T H_{im} Q_{imt} + \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T \tau_m Q_{imt}$$

$$g_1^{CoExW} = \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T [k_{imt} Y_{imt} + H_{im} Q_{imt} + \tau_m Q_{imt}] + \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T [h_i I_{it} - D_{it} v_i z_{1i}] \quad (5c.33)$$

5.5.6 Formulación del problema coordinado en el contexto del *incoterm* DDP

Bajo el contexto del *Incoterm* DDP, el mínimo coste total para el proveedor utilizando la estrategia *ECR* durante el horizonte finito de T períodos, el modelo bicriterio de optimización lineal entera conlleva las siguientes principales modificaciones:

(MMC-DDP)

$$\text{Min } g_0^{CoDDP} = \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T A_S X_{it} + \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T A_i Y_{imt} + \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T D_{it} v_i z_{1i} + \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T D_{it} \tau_m z_{2m} + \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T \tau_m Q_{imt} \quad (5c.34)$$

$$\text{Máx } g_0^{efDDP} = \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T \varphi_m Q_{imt} \quad (5c.35)$$

Sujeto a:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T D_{it} \tau_m z_{2m} = \left[\sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T \tau_m Q_{imt} - g_{2m}^{nC} (1 - S_2) \right] \quad i = 1, \dots, n \quad (5c.36)$$

$$z_{2m} \geq 0 \quad m = 1, \dots, M \quad (5c.37)$$

En donde, la función (5c.34) [que modifica a la (5c.17)] representa el coste mínimo del proveedor, quién además de absorber los costes ya señalados en el escenario ExW, incluye el coste que debe asumir por proporcionar un descuento al cliente por concepto de transporte $S_2\%$. Para ser más específicos, es importante recordar que en el contexto DDP el proveedor se hace cargo de entregar las mercancías en la planta del cliente incluyendo generalmente este coste en el precio del producto, situación que no ocurre en el contexto ExW. De esta manera, en el escenario DDP el proveedor tiene

cierto control sobre el transporte de las mercancías generándose la posibilidad de otorgar un descuento adicional por este concepto (z_{2m}).

Por lo anterior, la restricción (5c.36) surge como un imperativo para garantizar el descuento sobre los costes incurridos sin coordinación (g_{2im}^{nC}) por los productos transportados por el modo m , como parte de una mejor negociación de las tarifas por efecto de los volúmenes de carga y una mayor coordinación de los envíos.

El modelo completo para la coordinación de inventarios en el contexto del *Incoterm* DDP queda de la siguiente manera (véase, ⁶):

(MMC-DDP-1)

$$\text{Min } g_0^{\text{CoDDP}} = \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T A_S X_{it} + \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T A_i Y_{imt} + \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T D_{it} v_i z_{1i} + \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T D_{it} \tau_m z_{2m} + \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T \tau_m Q_{imt} \quad (5c.34)$$

$$\text{Máx } g_0^{\text{efDDP}} = \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T \varphi_m Q_{imt} \quad (5c.35)$$

Sujeto a:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T D_{it} \tau_m z_{2m} = \left[\sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T \tau_m Q_{imt} - g_{2m}^{nC} (1 - S_2) \right] \quad i = 1, \dots, n \quad (5c.36)$$

$$\sum_{t=1}^T D_{it} v_i z_{1i} = \left[\left(\sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T k_{imt} Y_{imt} + \sum_{t=1}^T h_i I_{it} \right) - g_i^{mC} (1 - S_1) \right] \quad i = 1, \dots, n \quad (5c.19)$$

$$I_{it} = I_{i,t-1} + \sum_{m=1}^M Q_{im,t-m+1} - D_{it} \quad i = 1, \dots, n; \quad t = 1, \dots, T(m) \quad (5c.20)$$

$$Q_{imt} \leq R_{imt} Y_{imt} \text{ con } R_{imt} = \sum_{t=1}^T D_{it} \quad i = 1, \dots, n; \quad m = 1, \dots, M; \quad t = 1, \dots, T(m) \quad (5c.21)$$

$$I_{i,0} = 0 \quad i = 1, \dots, n \quad (5c.22)$$

$$\sum_{k=2}^{T_0} Y_{imk} + \sum_{k=T_0+2}^{2T_0} Y_{imk} + \sum_{k=2T_0+2}^{3T_0} Y_{imk} + \dots + \sum_{k=rT_0+2}^w Y_{imk} \leq P_{T_0} M_2 \quad (5c.30)$$

$i = 1, \dots, n; \quad m = 1, \dots, M; \quad T_0 \in \Omega$

$$\text{con } M_2 = T - 1, \quad r = \left\lfloor \frac{T(m) - 2}{T_0} \right\rfloor, \quad w = \min \{ (r+1)T_0, T(m) \}$$

⁶ Debido a que se está respetando el número original de la formulación de las ecuaciones, la secuencia aparece discontinua en este problema modificado.

$$\sum_{T_0 \in \Omega} P_{T_0} = (H - 1) \text{ en donde } H \text{ es igual al número de elementos de } \Omega \quad (5c.31)$$

$$P_{T_0} \in \{0, 1\} \quad T_0 \in \Omega \quad (5c.32)$$

$$\sum_{m=1}^M Y_{imt} \leq M_1 X_{it} \quad \text{con } M_1 = n \quad i = 1, \dots, n; \quad t = 1, \dots, T(m) \quad (5c.24)$$

$$Y_{imt}, X_{it} \in \{0, 1\} \quad i = 1, \dots, n; \quad m = 1, \dots, M; \quad t = 1, \dots, T(m) \quad (5c.25)$$

$$I_{it}, Q_{imt} \geq 0 \text{ entero} \quad i = 1, \dots, n; \quad m = 1, \dots, M; \quad t = 1, \dots, T(m) \quad (5c.26)$$

$$z_{1i} \geq 0 \quad i = 1, \dots, n \quad (5c.27)$$

$$T_0 \in \Omega \quad \text{donde } \Omega \text{ está formado por elementos del conjunto:} \\ \{x \mid 2 \leq x \leq T(m), \text{ entero}\} \quad (5c.28)$$

$$z_{2m} \geq 0 \quad m = 1, \dots, M \quad (5c.37)$$

Por lo anterior, a partir de la sustitución de estas modificaciones en el modelo *MMC-ExW*, [ecuaciones 5c.17 a 5c.32], el coste g_1^{CoDDP} del cliente (utilizando la estrategia *ECR*) se obtiene por medio de la siguiente expresión:

$$g_1^{CoDDP} = \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T k_{imt} Y_{imt} + \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T h_i I_{it} - \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T D_{it} v_i z_{1i} - \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T D_{it} \tau_m z_{2m} + \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T H_{im} Q_{imt} \\ g_1^{CoDDP} = \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T [k_{imt} Y_{imt} + H_{im} Q_{imt} - D_{it} \tau_m z_{2m}] + \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T [h_i I_{it} - D_{it} v_i z_{1i}] \quad (5c.38)$$

El modelado de los *Incoterms* denominados como “intermedios”, pueden ser también simulados con la identificación proporcional del lugar acordado donde se lleve a cabo el traslado de los costes de transporte entre el cliente y el proveedor.

Para el modelo no coordinado (*MMNC*), el coste total de sistema se determina por la suma de los costes del proveedor y el cliente de la siguiente manera:

$$CT_S^{nC} = \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T k_{imt} Y_{imt} + \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T h_i I_{it} + \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T H_{im} Q_{imt} + \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T \tau_m Q_{imt} + \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T A_S X_{it} + \sum_{t=1}^T A_i Y_{imt} \quad (5c.39)$$

Para cada función de desempeño de transporte: g_{1i}^{ef}

Para el modelo coordinado (*MMC-ExW*) en el escenario del *Incoterm ExW*, el coste total de sistema se determina por la suma de los costes del proveedor y el cliente de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 CT_S^{CoExW} &= \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T A_S X_{it} + \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T A_i Y_{imt} + \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T k_{imt} Y_{imt} \\
 &\quad + \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T h_i I_{it} + \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T H_{im} Q_{imt} + \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T \tau_m Q_{imt} \\
 CT_S^{CoExW} &= \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T [A_S X_{it} + h_i I_{it}] + \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T [A_i Y_{imt} + k_{imt} Y_{imt} + H_{im} Q_{imt} + \tau_m Q_{imt}] \quad (5c.40)
 \end{aligned}$$

Para cada función de desempeño de transporte: g_0^{efExW}

Para el modelo coordinado (*MMC-DDP*) en el escenario del *Incoterm DDP*, el coste total de sistema se determina por la suma de los costes del proveedor y el cliente de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 CT_S^{CoDDP} &= \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T A_S X_{it} + \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T A_i Y_{imt} + \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T k_{imt} Y_{imt} \\
 &\quad + \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T h_i I_{it} + \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T H_{im} Q_{imt} + \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T \tau_m Q_{imt} \\
 CT_S^{CoDDP} &= \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T [A_S X_{it} + h_i I_{it}] + \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T [A_i Y_{imt} + k_{imt} Y_{imt} + H_{im} Q_{imt} + \tau_m Q_{imt}] \quad (5c.41)
 \end{aligned}$$

Para cada función de desempeño de transporte: g_0^{efDDP}

5.5.7 Tipificación de los modelos propuestos

Por el hecho de que los modelos buscan minimizar el coste total por la gestión de inventarios y maximizar el nivel de servicio de transporte, en primer lugar, puede decirse que se encuentran inmersos en un esquema multicriterio formulado como un problema de programación matemática entera. En términos generales, ambos criterios

son incompatibles y se encuentran en conflicto, provocando que el tomador de decisiones se enfrente con problemas de selección de las alternativas asociadas a dichos criterios. El planteamiento de estos dos criterios, dan lugar a dos funciones de valor de carácter lineal, y por lo tanto convexas, (véase, Bazaraa y Jarvis, 1990).

El dominio de las variables de los modelos propuestos, básicamente se encuentran circunscritos a valores enteros y debe cumplir con un conjunto de restricciones lineales. Los datos del modelo son deterministas y su temporalidad es dinámica.

Al incrementarse el número de funciones de valor, la cantidad de productos n , el número de períodos T y el número de modos de transporte m , la complejidad del modelo crece en forma cuadrática de la siguiente forma: para el modelo ExW, el número de variables es igual a $(2nT+n+4nmT-3)$, y el número de restricciones $(3n+2nT+nmT+5nm+1)$; para el modelo DDP, $(2nT+n+4nmT-3+m)$ y $(3n+2nT+nmT+5nm+1+m)$, respectivamente. En consecuencia, el tiempo que necesita para resolver el problema de optimización aumenta considerablemente al tener un mayor número de variables y restricciones involucradas, además de que los modelos de programación entera multiobjetivo son mucho más complejos para resolver que los problemas continuos.

Los tres modelos formulados de programación matemática multicriterio, buscan minimizar el coste de la gestión no coordinada y coordinada de los inventarios, y maximizar el nivel de servicio de transporte combinado en el ámbito del comercio internacional, utilizando la estrategia de *Épocas Comunes de Resurtido*.

Los modelos, determinan: *a)* el coste mínimo de la gestión coordinada de los inventarios; *b)* el tamaño óptimo de la orden (pedido); *c)* el período de abastecimiento; *d)* seleccionan el modo de transporte; *e)* definen el nivel de servicio de transporte; *f)* ayudan a definir el tipo de negociación o *Incoterm*; *g)* calculan el descuento en el precio de los productos y en las tarifas de transporte que funcionan como mecanismos para motivar la coordinación. La formulación matemática, también permite conocer el coste total del sistema (cliente-proveedor) para el caso coordinado como no coordinado. El cuadro 5.2 a continuación resume estas características.

Cuadro 5.2
Características de los modelos propuestos

Supuestos						
Demanda	Producto	Eslabones	Horizonte de planeación	Precio del producto	Estrategia	Control del canal
Determinista y variable	Multi-producto	Un proveedor y un cliente	Finito	Individual y variable	ECR	Cliente
Modelado						
Factor transporte	Enfoque del modelado	Función objetivo				
Explícito como variable de decisión (tres modos)	Programación lineal entera multiojetivo	Objetivo 1. Minimizar costes		Objetivo 2. Maximizar nivel de servicio		
Objetivos a optimizar por el proveedor			Objetivos a optimizar por el cliente			
1) Coste por procesar cada orden lanzada (<i>set up</i>)			1) Coste por ordenar			
2) Coste por atender el conjunto de n productos			2) Coste de almacenamiento			
3) Coste del descuento aplicado a cada producto			3) Coste de inventario en tránsito			
4) Coste del descuento aplicado al transporte utilizado			4) Coste de transporte			
5) Maximizar el nivel de servicio del transporte (<i>Incoterm DDP</i>)			5) Maximizar el nivel de servicio del transporte (<i>Incoterm ExW</i>)			
6) Coste total del sistema						
Variables de decisión						
1) Calcular la cantidad óptima de la orden			6) Determinación del nivel de servicio de transporte			
2) Determinación del período de suministro			7) Cálculo del descuento aplicado a las tarifas de transporte			
3) Nivel de inventario por período			8) Definición del tipo de negociación o <i>Incoterm</i>			
4) Cálculo del descuento aplicado en los productos						
5) Cantidad óptima de la orden por modo de transporte						

5.6 Conclusiones

Como se pudo observar en el capítulo anterior, existen una cantidad importante de modelos orientados a la coordinación de inventarios. En términos generales, su objetivo está enfocado a la reducción de los costes totales y al establecimiento de una política de inventarios. A diferencia de dichos modelos, los desarrollados en este capítulo proponen el estudio de dicho tópico pero considerando de manera explícita diferentes modos de transporte y el impacto de su nivel de servicio en el proceso del abastecimiento y en la definición de una política de inventario, utilizando como mecanismo adicional un descuento en las tarifas del transporte en el contexto internacional. Justamente, el cuadro 5.3 permite ver las diferencias que existen entre los modelos de referencia y los desarrollados en este capítulo. En dicho cuadro se aprecia que es significativo el hecho de que los modelos propuestos reportan un mayor número de variables de decisión, a partir de la consideración explícita de dos criterios u

objetivos en diferentes escenarios del comercio internacional, lo que permite una mayor visibilidad de la cadena de suministro, de la cual, el cliente y el proveedor pueden ver cumplido un mayor número de objetivos individuales.

Cuadro 5.3
Comparación de las características de los modelos de referencia y los modelos propuestos

Características	Autores			
	Viswanathan y Piplani	Chang y Tsai	Reyes y Gaytán	Modelos propuestos
Año	2001	2002	2003	2006
Demanda	Determinista y constante	Determinista y constante	Determinista y variable	Determinista y variable
Producto	Un producto	Un producto	Multi-producto	Multi-producto
Eslabones	Un proveedor y varios clientes	Un proveedor y varios clientes	Un proveedor y un cliente	Un proveedor y un cliente
Horizonte de planeación	Infinito	Infinito	Finito	Finito
Precio del producto	Variable por descuento	Variable por descuento	Único para todos Variable por descuento	Diferente para cada producto Variable por descuento
Estrategia	ECR	ECR	ECR	ECR
Control del canal	Cliente	Cliente	Cliente	Cliente
Transporte de los productos	Implícito en la formulación del modelo	Implícito en la formulación del modelo	Explícito predefinido	Explícito por calcular
Modos de transporte	No especificado	No especificado	Dos modos	Tres modos
Enfoques de modelado	Programación lineal entera	Programación lineal entera	Programación lineal entera	Programación lineal entera multiobjetivo
Función objetivo	Minimizar costes	Minimizar costes	Minimizar costes	1. Minimizar costes 2. Maximizar nivel de servicio de transporte
Objetivos individuales a optimizar por el proveedor	1) Coste por procesar cada orden lanzada (<i>set up</i>) 2) Coste por atender un conjunto de órdenes 3) Coste del descuento aplicado al producto	1) Coste por procesar cada orden lanzada (<i>set up</i>) 2) Coste por atender un conjunto de órdenes 3) Coste del descuento aplicado al producto 4) Costes por enviar la orden (transporte)	1) Coste por procesar cada orden lanzada (<i>set up</i>) 2) Coste por atender un conjunto de órdenes 3) Coste del descuento aplicado al producto	1) Coste por procesar cada orden lanzada (<i>set up</i>) 2) Coste por atender el conjunto de n productos 3) Coste de descuento aplicado a cada producto 4) Coste del descuento aplicado al transporte utilizado 5) Maximizar el nivel de servicio del transporte (<i>Incoterm DDP</i>)
Objetivos individuales a optimizar por el (o los) cliente(s)	1) Coste por ordenar 2) Coste de almacenamiento	1) Coste por ordenar 2) Coste de almacenamiento 3) Costes de recibo de la orden	1) Coste por ordenar 2) Coste de almacenamiento 3) Coste de inventario en tránsito 4) Coste de transporte	1) Coste por ordenar 2) Coste de almacenamiento 3) Coste de inventario en tránsito 4) Coste de transporte 5) Maximizar el nivel de servicio de transporte (<i>Incoterm ExW</i>)
Variables de decisión	1) Cantidad óptima de la orden 2) Determinación del período de suministro 3) Cálculo del descuento aplicado en los productos	1) Cantidad óptima de la orden 2) Determinación del período de suministro 3) Cálculo del descuento aplicado en los productos	1) Cantidad óptima de la orden 2) Determinación del período de suministro 3) Nivel de inventario por período 4) Cálculo del descuento aplicado en los productos 5) Cantidad óptima por modo de transporte (*)	1) Calcular la cantidad óptima de la orden 2) Determinación del período de suministro 3) Nivel de inventario por período 4) Cálculo del descuento aplicado en los productos 5) Cantidad óptima de la orden por modo de transporte 6) Determinación del nivel de servicio de transporte 7) Cálculo del descuento aplicado a las tarifas de transporte 8) Definición del tipo de negociación o <i>Incoterm</i>

Nota (*): Este modelo calcula la cantidad de carga transportada por modo a partir de un reparto predefinido.

En términos generales, puede establecerse que la coordinación de inventarios no ha sido estudiada desde la óptica de este trabajo de investigación. Es decir, a partir de la perspectiva multicriterio, se afirma que la coordinación de inventarios es novedosa debido a que la decisión de coordinarse, para este caso, no se basa en sólo un criterio (coste) como lo hacen la mayoría de los trabajos que tratan el tema, sino que permite tomar en cuenta algún otro criterio de gestión (en este caso, nivel de servicio de transporte). Esto hace que el tema sea relevante debido a la complejidad que representa la toma de decisiones sobre la combinación de factores cuantitativos y cualitativos, desde un punto de vista multicriterio.

Teniendo en cuenta las consideraciones antes señaladas, así como los modelos de referencia, el objetivo de este capítulo se ha cumplido, toda vez que se han desarrollado dos modelos multicriterio que involucran los conceptos vertidos en el planteamiento del problema, soportados por sólidas teorías.

Durante el desarrollo de dichos modelos, en términos generales, puede establecerse que ha habido dos puntos fundamentales que dieron origen a los mismos:

El primero es el hecho de haber utilizado el modelado multicriterio, el cual permitirá generar un conjunto de soluciones para la toma de decisiones, y no sólo una como lo hace el concepto tradicional de optimización. El segundo, tiene cuenta que el diseño de los modelos se ha pensado para que el tomador de decisiones tenga una participación más activa en el proceso de solución.

Por esto último, debido a la necesidad de evaluar las preferencias del tomador de decisiones sobre los criterios propuestos, o simplemente evaluar el efecto del cambio de alguno de los parámetros, es indispensable el uso de un método de solución que permita al modelo ser eficiente, eficaz y flexible. Por este motivo, el método de solución requerido para atender esta cuestión es presentado en el capítulo siguiente.

Antes, cabe señalar que debido al ámbito del problema propuesto, puede clasificarse como un problema de determinación del tamaño del lote con demanda dinámica, en el contexto de los modelos conocidos comúnmente como “*Lot Sizing Problem*” (Sucky, 2002). También, es preciso puntualizar que en el fondo, estos modelos llevan implícito la promoción de nuevas prácticas logísticas y la motivación

por desarrollar nuevas estrategias de interrelación empresarial, que dan paso a la integración de los procesos por medio de la coordinación.

Por tanto, al mismo tiempo de plantear modelos que resuelvan la política de inventarios a través de la coordinación, se está buscando dar solución a otro tipo de problemas de la cadena de suministro como son: la toma de decisiones racionales, oportunas y seguras para el establecimiento de políticas conjuntas para la administración de inventarios y selección del modo de transporte; organizacionales, en términos de una mejora de las interrelaciones empresariales, fomento de mecanismos y formas de coordinación; en el contexto económico, las empresas pueden alcanzar el equilibrio de las partes, reduciendo el nivel de incertidumbre implementando estrategias comunes, entre otros problemas de gestión.

Referencias

1. (Baker, 1993) Baker, K. R. (1993). "Requirements Planning". Chapter 11, S C Graves, *et al.* Eds. Handbooks in OR & MS; vol. 4, pp. 123-157.
2. (Banomyong y Beresford, 2001) Banomyong, Ruth y Beresford, Anthony K.C. (2001). "Multimodal Transport: the Case of Laotian Garment Exporters". *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*; vol. 31, num. 9.
3. (Bazaraa y Jarvis, 1990) Bazaraa, M. S. y Jarvis, J.J. (1990). "Linear Programming and Network Flows". Wiley, New York.
4. (Beamon, 1998) Beamon, B. (1998). "Supply Chain Design and Analysis: Models and Methods". *International Journal Production Economics*; vol 55, pp. 281-294.
5. (Beyer y Ward, 2000) Beyer, Dirk y Ward, Julie (2000). "Network Server Supply Chain at HP: A Case Study". Software Technology Laboratory. Hewlett-Packard Laboratories, Hewlett Packard Company, Palo Alto, CA.
6. (Cachon, y Netessine, 2004) Cachon, Gerard P. y Netessine, Serguei (2004). "Game Theory in Supply Chain Analysis". En "Supply Chain Analysis in the eBusiness Era". David Simchi-Levi, S. David Wu, and Z. Max Shen (Eds.); Publicado por: Kluwer Academic Publishers. Capítulo 2. pp 13-59.
7. (Centinkaya, *et al*, 2006) Centinkaya, S., Mutlu, F., y Lee, C. (2006). "A Comparison of Outbound Dispatch Policies for Integrated Inventory and Transportation Decisions". *European Journal of Operational Research*, vol. 171, Issue 3, pp 1094-1112.
8. (Chang y Tsai, 2002) Chang, Wen-Jen y Chich-Hung Tsai (2002). "A Two-Echelon Inventory Model for Single-Vender and Multi-Buyer System through Common Replenishment Epochs". *International Journal of the Computer, The Internet and Management*; vol. 10, num. 3, pp. 48- 61.
9. (Chase, *et al*, 1998) Chase, R.B., Aquilano, N.J. y Jacobs, F.R. (1998). "Production and Operations Management: Manufacturing and Services". 8th ed. Irwin, McGraw-Hill.
10. (CIDEM, 2004) CIDEM - Centro de innovación y desarrollo empresarial (2004). "Guías de gestión de la innovación: Producción y logística". Departamento de Trabajo, Industria, Comercio y Turismo. Catalunya, España. 1ª edición en castellano: marzo de 2004, ISBN 84-393-6186-6. Autores: equipo de profesores de ESADE. Coordinador: Xavier Ferràs, CIDEM. p 10.

11. (Claramunt, *et al.*, 1996). Claramunt, Ana; Giner, Elena; Marsonet, Pedro; Tomassetti, Zulema; Pasteris, Elizabeth y Koleda, Andrés (1996). "Consideraciones sobre la demanda por transporte de carga". Trabajo presentado en la Asociación Argentina de Economía Política. Página web: <http://www.aaep.org.ar/espa/anales/pdf/claramunt.pdf>.
12. (Córdoba, 2001) Córdoba, Vladimir (2001). "¿Cómo fijar costes y precios?". Banco del Comercio Exterior en Venezuela. Programa de capacitación del comercio exterior, Venezuela.
13. (Cournot, 1838) Cournot, Augustin (1838). "Recherches sur les Principes Mathématiques de la Théorie des Richesses". París, Hachette.
14. (Dimand, 1996) Dimand, Mary A (1996). "History of Game Theory Vol. 1: From the Beginnings to 1945". London, UK: (Biblioteca digital de la Universidad Politécnica de Valencia) Routledge <http://site.ebrary.com/lib/bibliotecaupv/Doc?id=10058113&ppg=55>.
15. (Duma, 1999) Duma, Lázló (1999). "The Measurement of the Performance of Freight Transportation". Periodical Polytechnica Ser. Transp. Eng; vol. 27, num. 1-1, pp. 83-92.
16. (Dyer y Shing, 1998) Dyer, J.H. y Shing, H. (1998). "The Relational View: Cooperative Strategy and Sources of Interorganizational Competitive Advantage", Academy of Management Review, vol. 23, num 4, pp. 660-79.
17. (Feng, *et al.*, 2002) Feng, Q, Gallego, G, Sethi, S. P, Yan, H. y Zhang, H. (2005). "Periodic-Review Inventory Model with Three Consecutive Delivery Modes and Forecast Updates1". Journal of Optimization Theory and Applications: vol. 124, num. 1, pp. 137-155, January.
18. (Fisher, 1997) Fisher, M. L. (1997). "What is the Right Supply Chain for your Product?" Harvard Business Review, 75, Mar-April, 105-116.
19. (Ganeshan, *et al.*, 1998) Ganeshan, Ram; Jack, Eric; Magazine, M.J. y Stephens, Paul (1998) "A Taxonomic Review of Supply chain Management". En "Quantitative Models for Supply Chain Management". Editores: Tayur, Ganeshan, and Magazine; Kluwer Academic Publishers, pp 839-879.
20. (Gökçen y Ağpak, 2004) Gökçen, Hadi, y Ağpak, Kürşad (2004) "A Goal Programming Approaches to Simple U-Line". European Journal of Operational Research, Received 27 January 2003; accepted 8 September 2004 (en impresión).
21. (Goyal, 1974) Goyal, S. K. (1974). "Determination of Optimum Packaging Frequency of Items Jointly Replenished". Management Science; vol 6, pp. 1-22.
22. (Hurink y Knust, 2005) Hurink, Johann y Knust, Sigrid (2005). "Tabu Search Algorithms for Job-Shop Problems with a Single Transport Robot". European Journal of Operational Research; vol 162, pp 99-111.
23. (Jans y Degraeve, 2005) Jans, Raf y Degraeve, Zeger (2005). "Modeling Industrial Lot Sizing Problems: A Review". ERIM Report Series Research in, Erasmus Universiteit Rotterdam Management; Publisher: Series/Report no.: ERS-2005-049-LIS; <http://hdl.handle.net/1765/6912>.
24. (Jemai y Karaesmen, 2005) Jemai, Zied y Karaesmen, Fikri (2005). "Decentralized Inventory Control in a Two-Stage Capacitated Supply Chain". Department of Industrial Engineering Ko,c University 34450, Istanbul TURKEY http://home.ku.edu.tr/~fkaraesmen/pdfpapers/JK_v2_05.pdf.
25. (Jiménez, 2004) Jiménez, Elías (2004). "Los factores críticos de éxito de la cadena de suministro". Instituto Mexicano del Transporte; Publicación Técnica núm. 237, ISSN 0188-7297; Querétaro, México.
26. (Kelly, 2003) Kelly, Anthony (2003). "Decision Making Using Game Theory: An Introduction for Managers". West Nyack, NY, USA: Cambridge University Press.
27. (Lambert y Gardner, 1996) Lambert, Emmelhainz, M y Gardner, J (1996). "Developing and Implementing Supply Chain Partnerships". The International Journal of Logistics Management; vol. 7, num. 2, p. 2.

28. (López y Sabater, 1998) López, Yepes J. A. y Sabater, S. Ramón (1998) “La teoría de los recursos y capacidades de la empresa. una revisión.” Departamento de Organización de Empresas. Universidad de Murcia, España. Página web: <http://www.um.es/fee/documentos/dt2-00.pdf>.
29. (Lozano, *et al*, 1991) Lozano, J. S; Larrañeta y L. Onieva (1991). “Planificación multinivel con limitaciones de capacidad” Dpto. de Organización de Empresas, ETSIIS, Universidad de Sevilla, Revista QÜESTIÓ, vol. 15, núm. 2, pp. 211-229. http://io.us.es/Publicaciones/Art_RN.htm.
30. (Meca, *et al*, 1991) Meca, Ana; Timmer, Judith; García –Jurado, Ignacio; y Borm, Meter (1991) “Inventory Games”. Journal of Economic Literature Classification Number: C71. 1991 Mathematics Subject Classification Number: 90D12, 90B05.
31. (Mishra, 2004) Mishra, Ajay K. (2004). “Selective Discount for Supplier-Buyer Coordination Using Common Replenishment Epochs”. Production, Manufacturing and Logistics. European Journal of Operational Research; vol 153, pp. 751-756.
32. (Ortega, 2004) Ortega, R. Isabel (2004). “México, en desventaja por los altos costos logísticos”. Nota periodística en el Economista.com.mx; 23 de Septiembre.
33. (Parks, 2001) Parks, L. (2001). “Wal-Mart Gets Onboard Early with Collaborative Planning”, Drug Store News; vol. 23, num. 2, p. 14.
34. (Reyes y Gaytán, 2003) Reyes y Gaytán (2003). “La coordinación del abastecimiento a través de épocas comunes de resurtido, evaluando dos modos de transporte”. Tesis presentada para obtener el grado de Maestro en Ciencias con la Especialidad en Sistemas de Calidad y Productividad. Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey, Campus Toluca.
35. (Sethi, *et al*, 2005) Sethi, Suresh T, Yan, Houmin, Zhang, Hanqin, Gallego, Guillermo y Huang, Ying (2005). “Periodic Review Inventory Model with Three Delivery Modes and Forecast Updates”. Journal of Optimization Theory and Applications: vol. 124, num. 1, pp. 137–155.
36. (Silver, *et al*, 1998) Silver, E., Pyke, D.F., y Peterson, R. (1998). “Inventory Management and Production and Scheduling”. Third Ed. John Wiley & Sons, USA.
37. (Simatupang y Sridharan, 2002) Simatupang, T.M. y Sridharan, R. (2002). “The Collaborative Supply Chain”, The International Journal of Logistics Management; vol. 13 num. 1, pp. 15-30.
38. (Sucky, 2002) Sucky, Eric (2002). “A Single Buyer-Single Supplier Bargaining Problem with Asymmetric Information. Theoretical Approach and Software Implementation”. IEEE. Computer, Society. Department of Supply Chain Management, Goethe-University, Mertonstr. 17, 60054 Frankfurt, Germany.
39. (Toniolo y Clark, 2001) Toniolo Staggemeier, Andréa y Clark, Alistair R, Clark (2001). “A Survey of Lot-Sizing and Scheduling Models”. 23rd Annual Symposium of the Brazilian Operational Research Society (SOBRAPO) Campos do Jordão, Brazil.
40. (Tyworth, 1992) Tyworth, J. E. (1992). “Modeling Transportation-Inventory Trade-Offs in a Stochastic Setting,” Journal of Business Logistics; vol. 13, num. 2, pp. 97-124.
41. (van Hoesel y Wagelmans, 1990) van Hoesel y Wagelmans, Albert. (1990). “Sensitivity Analysis of the Economic Lot-Sizing Problem”. Econometric Institute, Erasmus University Rotterdam; Disponible: <https://dspace.mit.edu/bitstream/1721.1/5146/1/OR-238-90.pdf#search=%22van%20hoesel%20and%20wagelmans%201990%22>.
42. (Viswanathan y Iplani, 2001) Viswanathan, S. y Iplani, Rajesh (2001). "Coordinating Supply Chain Inventories through Common Replenishment Epochs". European Journal of Operational Research; vol. 129, pp. 277-286.
43. (Viswanathan, 1996) Viswanathan, S. (1996). “A New Optimal Algorithm for the Joint Replenishment Problem”. Journal of Operational Research Society; vol. 47, pp. 936-944.
44. (von Stackelberg, 1934) von Stackelberg, H. (1934). “Marktform und Gleichgewicht”. Wien: Verlag von Julius Springer.
45. (Wagner y Whitin, 1958) Wagner H. M. y Whitin T. M. (1958).”A Dynamic Version of the Economic Lot-sizing Model”. Management Science; vol. 5, pp. 89-96.

46. (Walker, *et al*, 2000) Walker, B., Bovet, D. y Martha, J. (2000). "Unlocking the Supply Chain to Build Competitive Advantage". *The International Journal of Logistics Management*; vol. 11, num. 2, pp. 1-8.
47. (Yokohama y Santos, 2005) Yokohama, Masao y Santos, Daryl (2005). "Discrete Optimization Three-Stage flow-Shop Scheduling with Assembly Operations to Minimize the Weighted Sum of Product Completion Times". *European Journal of Operational Research*; vol. 161 pp. 754–770.

Capítulo 6

Elección del método de solución de problemas multiobjetivo y diseño del esquema de modelado

6.1 Introducción

Como ya ha sido mencionado, es común que el tomador de decisiones se enfrente con problemas de selección de alternativas que están asociadas a criterios incompatibles, y muchas veces en conflicto. Sin temor a lo contrario, puede decirse que la gran mayoría de los casos del mundo real son problemas con múltiples criterios u objetivos que no hacen fácil la tarea de inclinarse por alguna solución. Por ejemplo, para determinar el plan más adecuado en el sistema de producción, los criterios más comunes son: la tasa de fabricación, calidad y el coste de las operaciones, mismos que se encuentran muy a menudo en conflicto. Según Korhonen (1998), la toma de decisiones con múltiples criterios se refiere a resolver problemas de decisión y planeación involucrando múltiples criterios u objetivos. Para este autor, “resolver”, significa que el Tomador de Decisiones (en adelante, TD) seleccionará una alternativa de entre un conjunto de manera irrevocable. Teniendo en cuenta que para este tipo de problemas no existe solución única, la elección no resulta sencilla.

Para el caso concreto de los modelos propuestos en esta tesis, las diferentes intercambios (*trade-off*) que existen entre el coste total por la gestión de inventarios y el nivel de servicio de transporte para el traslado de productos, dan origen a múltiples soluciones que requiere de un método que ayude al tomador de decisiones a seleccionar alguna alternativa “razonable”,¹ que permita definir simultáneamente la política de inventario y de transporte.

Ante estas circunstancias, y específicamente para los modelos propuestos en esta tesis, el cuestionamiento que se busca responder en esta etapa consiste en definir ¿Cómo ayudar al TD ha encontrar la “mejor” solución de un conjunto de alternativas “razonables” cuando éstas son evaluadas utilizando los dos criterios mencionados? Para

¹ En problemas multicriterio la palabra “razonable” es entendida como “eficiente” o “no dominado”, tal y como se definirá más adelante.

responder esta pregunta, se han revisado los métodos de solución más divulgados en la literatura científica que resuelven problemas del tipo multicriterio/multiobjetivo.

Por lo tanto, el objetivo específico de este capítulo es seleccionar, y en su caso, delinear un método (o más de uno) que se adapte(n) a las características y supuestos de los modelos propuestos para definir la política de inventarios, pensando de antemano que el tomador de decisiones pueda intervenir de manera directa en la elección de la solución final.

Por lo anterior, primeramente en este capítulo se presenta una serie de conceptos que ayudan a comprender los términos empleados en la optimización multiobjetivo basados en Steuer (1986), Korhonen (1998), Miettinen (1999), Steuer (2000) y Deb (2001). Después, brevemente se exponen los métodos más difundidos que dan solución a este tipo de problemas. Más tarde, con la ayuda del proceso de selección de Sen y Yang (1998) y el de Miettinen (1999), se hace una descripción del procedimiento de selección de los métodos empleados para resolver el problema en estudio. Seguidamente, se presenta el diseño metodológico para llevar a cabo el proceso de modelado y generar las alternativas de solución analizadas en el siguiente capítulo. Al final, se presentan las conclusiones derivadas del estudio y elección del método multiobjetivo. No obstante la elección realizada, en palabras de Kaisa Miettinen (1999), se reconoce que existe una gran variedad de métodos para optimización multiobjetivo, y según esta autora, en general ninguno es superior a otro.

6.2 Conceptos fundamentales

La programación multiobjetivo se concentra en definir soluciones del problema que satisfagan un conjunto de restricciones, y acercarse a los mejores valores de cada uno de los objetivos que intervienen. En términos matemáticos, el problema se expresa como sigue:

$$\text{Vector maximizar/minimizar } F(x) = \{f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x)\} \quad (6.1)$$

$$\text{Sujeto a: } g_j(x) \leq 0 \quad \forall j = 1, \dots, M \quad (6.2)$$

Donde x es un vector de n variables de decisión, y $f_i(x), i = 1, \dots, k$ son los criterios u objetivos que son *maximizados/minimizados* al mismo tiempo.

Sea $S = \{x \mid g_j(x) \leq 0, \forall j = 1, \dots, M\}$ el espacio de las decisiones, $S \subset \mathbb{R}^x$.

Sea $Z = \{Z \mid F(x) = z, \forall x \in S\}$ el espacio de los objetivos o criterios, $Z \subset \mathbb{R}^k$.

Para cada solución x en el espacio de las variables de decisión, existe un punto en el espacio de los objetivos denotado por $F(x) = z = (z_1, z_2, \dots, z_k)^T$. El mapeo tiene lugar entre el vector solución n-dimensional y un vector de objetivos k-dimensional. La figura 6.1 a continuación ilustra estos dos espacios y el mapeo entre ellos.

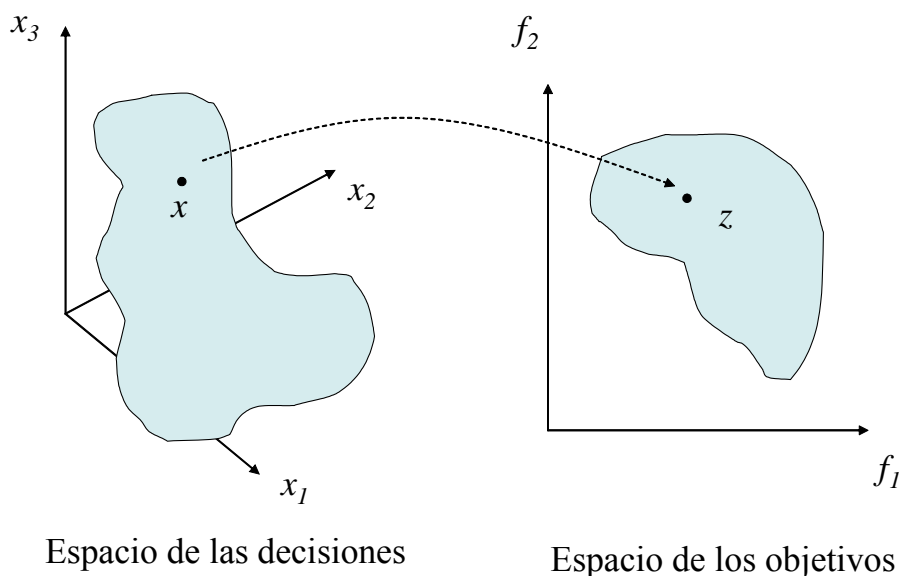


Figura 6.1
Representación del espacio de las decisiones y de los objetivos

Fuente: Deb (2001).

El conjunto Z es de especial interés. Muchas consideraciones en programación multiobjetivo son hechas.

El conjunto Z puede ser convexo/no convexo, limitado/ilimitado, conocido o desconocido, con un número finito o infinito de alternativas, etc. Cuando Z consiste de un número finito de alternativas, las cuales son explícitamente conocidas al inicio del proceso de solución, se tiene un importante clase de problemas que son llamados “problemas multicriterio discretos”. Cuando es el caso de que Z es infinito o no contable, son llamados “problemas de diseño múltiples criterios o problemas de múltiples criterios continuos”. En general, estos tipos de problemas están definidos por medio de la formulación de modelos matemáticos.

Un problema de programación multiobjetivo (MOP, por sus siglas en inglés) casi nunca tiene solución única. Conceptualmente, este tipo de programas puede ser considerado como una técnica que maximiza el valor de la función de utilidad, es decir:

$$\max v(z) \quad (6.3)$$

$$\text{Sujeto a: } z \in Z \quad (6.4)$$

Donde v es una función de valor real, la cual es estrictamente creciente en el espacio de los criterios y definida al menos en la región factible Z . La función v especifica la estructura de las preferencias del TD sobre la región factible. Sin embargo, el supuesto clave en la programación multiobjetivo es que v generalmente es desconocida. Si la función v es considerada explícita (conocida), un problema es considerado en la Teoría de la Utilidad Múltiples Atributos, y puede ser resuelto sin la intervención del tomador de decisiones. Este tipo de problemas no son considerados como problemas de decisión con múltiples criterios (MCDM; *Multiple Criteria Decision Making*); por el contrario, si la función v está implícita (se asume que existe pero que es desconocida), o ningún supuesto es hecho a cerca del valor de la función, el sistema es clasificado como MCDM o MOP (*Multiple Objective Programs*).

Las soluciones de un problema de programación multiobjetivo son todas aquellas las cuales pueden ser llamadas soluciones de alguno valor de la función $v: Z \rightarrow \mathfrak{R}$. Aquellas soluciones son llamadas eficientes o no dominadas, dependiendo del espacio dónde las alternativas son consideradas. El primero, es utilizado en el espacio de las variables de decisión, mientras que el segundo, en el espacio de los criterios u objetivos. Para algunos, esto último es indiferente.

En términos generales, y a pesar de que se reconoce que los términos objetivo y criterio son dos vocablos que tienen sentidos específicos; en el contexto de los problemas múltiples criterios u objetivos normalmente se asume el mismo significado.

6.2.1 Soluciones no dominadas

En principio, los problemas multiobjetivos son muy diferentes de los problemas monoobjetivo. En el caso de un solo objetivo, se intenta obtener la mejor solución, la cual supera a todas las otras alternativas. En el caso de múltiples objetivos no existe

una solución que sea mejor con respecto a todos los objetivos debido a la incompatibilidad y conflictos entre ellos. Una solución puede ser mejor en uno de sus objetivos pero peor en los otros. Sin embargo, usualmente existe un conjunto de soluciones para el caso de múltiples objetivos, las cuales no pueden ser simplemente comparadas entre sí. Dichas soluciones, llamadas *no dominadas* u óptimo de Pareto, permiten observar que la mejora en cualquier función objetivo se refleje en al menos uno de los otros objetivos. Para un punto no dominado en el espacio de los criterios, su punto imagen en el espacio de las decisiones S es llamado eficiente o no inferior. Un punto es eficiente si y sólo si su imagen en Z es no dominado.

Definición 1. Dado que $z^1, z^2 \in R^k$ son vectores de criterios (k), puede decirse que el vector z^1 *domina al* z^2 , si y sólo si, $z^1 \geq z^2$ y $z^1 \neq z^2$. Por ejemplo, $z_i^1 \geq z_i^2$ para toda i y $z_i^1 > z_i^2$ para al menos una i .

Estrictamente z^1 *domina a* z^2 , si ningún componente del vector z^1 es menor que su correspondiente componente en z^2 , y al menos un componente de z^1 es más grande que su correspondiente componente en z^2 .

Definición 2. Dado que $z^1, z^2 \in R^k$ son vectores de criterios, puede decirse que el vector z^1 *domina fuertemente al* vector z^2 , si y sólo si, $z_i^1 > z_i^2$. Es decir, que $z_i^1 > z_i^2$ para todos los componentes i .

Si z^1 *domina fuertemente al* vector z^2 , cada uno de los componentes de z^1 es más grande que su correspondiente componente en z^2 .

En la figura 6.2 se observan cinco opciones con diferentes valores en la función objetivo; la función $f_1(z)$ debe ser maximizada mientras que la $f_2(z)$ debe ser minimizada. Debido a que ambos criterios u objetivos son importantes, se complica determinar cuál solución es mejor con respecto a los dos objetivos. De acuerdo con las definiciones antes mencionadas, es factible establecer cuál de las soluciones es mejor entre cada par de soluciones en términos de ambos objetivos. Por ejemplo, si las soluciones z_1 y z_2 son comparadas, se observa que z_1 es mejor que la solución z_2 en ambas funciones. En tal virtud, se satisfacen las condiciones de dominancia ya

señaladas. Por este motivo, puede decirse que la solución z_1 domina a la solución z_2 . Tomando otra instancia de comparación, por ejemplo, z_1 y z_5 . En esta nueva comparación puede observarse que la solución z_5 es mejor que la solución z_1 en el primero de los objetivos, y no es peor (de hecho es igual) en el segundo objetivo. De esta manera, nuevamente se advierte que ambas condiciones se vuelven a cumplir, y por lo tanto, puede establecerse que la solución z_5 domina a la solución z_1 . Por lo anterior, es evidente que si la solución z_1 domina a la solución z_2 , la solución z_5 también domina a la solución z_2 .

Debido a que el concepto de dominancia permite comparar soluciones con múltiples objetivos, cabe señalar que muchos métodos usan el concepto de dominancia para buscar soluciones no dominadas.

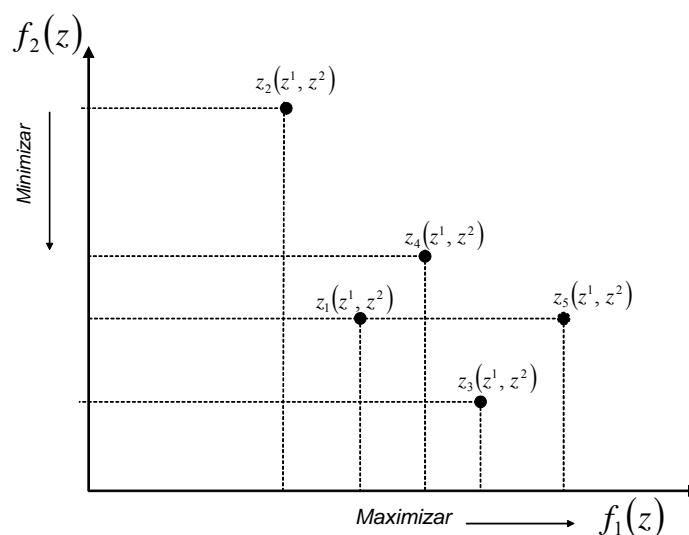


Figura 6.2
Una población de cinco soluciones

Fuente: Deb (2001).

6.2.2 Propiedades de la relación de dominancia

Con base en las definiciones de dominancia y la comparación paritaria entre dos soluciones cualesquiera, surgen las siguientes propiedades principales (considere el símbolo \preceq como dominancia):

Reflexiva. La relación de dominancia no es reflexiva debido a que cualquier solución p no se domina a si misma de acuerdo a la definición 1.

Simétrica. La dominancia no es simétrica, debido que si p no domina a q , no implica que $q \preceq p$. De hecho, lo opuesto es lo verdadero. Es decir, si $p \preceq q$, entonces q no domina a p . De este modo, la relación de dominancia es asimétrica.

Antisimétrica. Debido a que la relación de dominancia es simétrica, esta no puede ser antisimétrica también.

Transitiva. La relación de dominancia es transitiva. Esto es debido a que si $p \preceq q$, y $q \preceq r$, entonces $p \preceq r$.

6.2.3 Definición del conjunto no dominado

Un vector de criterios u objetivos es *no dominado* si este no es dominado por cualquier otro vector de criterios factible.

Definición 3. Considerando $\bar{z} \in Z$, Entonces, \bar{z} es un vector *no dominado*, si y sólo si, no existe otro vector $z \in Z$ tal que $z \geq \bar{z}$ y que $z \neq \bar{z}$. De otra manera, \bar{z} es un vector de criterios dominado que pertenece al conjunto no dominado.

Utilizando el concepto de traslado del cono de dominio en el espacio de los objetivos es posible identificar el conjunto no dominado.

Definición 4. Si el vector $\bar{z} \in Z$. Entonces, el cono del traslado del dominio en el espacio de los objetivos en \bar{z} , designado como $D_{\bar{z}}$, está dado por la traslación del orthante no negativo de R^k para \bar{z} , donde:

$$D_{\bar{z}} = \{\bar{z}\} \oplus \{z \in R^k \mid z \geq 0\} \tag{6.5}$$

Con el conjunto agregado \oplus efectuando una traslación del cono de dominio en el espacio de criterios para \bar{z} , el cono contiene todos los vectores que dominan a \bar{z} . Formalmente la importancia del traslado del orthante no negativo de R^k para detectar los vectores del espacio de los criterios puede definirse como:

Definición 5. Sea $D_{\bar{z}}$ el traslado del orthante no negativo de R^k . Luego, el vector \bar{z} es no dominado, si y sólo si, $D_{\bar{z}} \cap Z = \{\bar{z}\}$.

En otras palabras, si la intersección del traslado del orthante no negativo con la región factible Z solo contiene \bar{z} , entonces es no dominado. Si existen otros vectores criterio en la intersección, \bar{z} es dominado. La definición anterior, geoméricamente puede visualizarse de la siguiente manera:

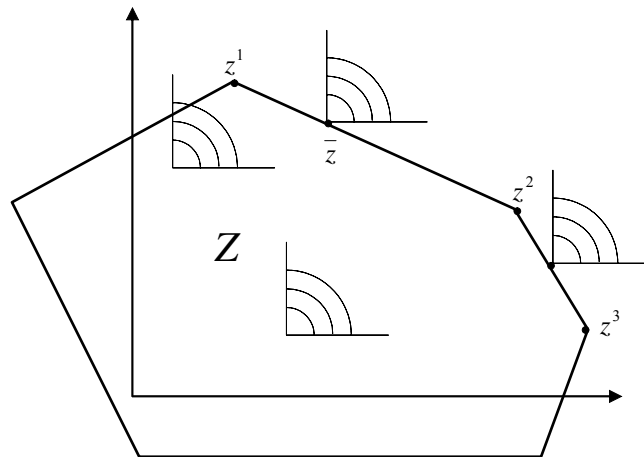


Figura 6.3
Definición del conjunto no dominado N

Fuente: Steuer (1986).

En la figura anterior se observa que $N = \gamma[z^1, z^2] \cup \gamma[z^2, z^3]$

6.2.4 Eficiencia

Debido a que dominancia se refiere a los vectores en el espacio de los criterios, la idea de eficiencia se refiere a los puntos en el espacio de decisión. Considerando que el vector de los criterios de un punto x en un problema multiobjetivo está dado por Cx , se tiene la siguiente definición de un punto eficiente en un programa lineal de múltiples objetivos.

Definición 6. Asuma un MOLP (*Multiple Objective Linear Programming*). Un punto $\bar{x} \in S$ es eficiente, si y sólo si, no existe otro $x \in S$ tal que $Cx \geq C\bar{x}$ y $Cx \neq C\bar{x}$. De otra manera \bar{x} es ineficiente.

Un punto $\bar{x} \in S$ es eficiente, si y sólo si, su vector de criterios no es dominado por el vector de criterios de algún otro punto en S . Es decir, desde un punto eficiente no es posible mover la viabilidad aumentando un objetivo sin reducir al menos uno de los otros. En un problema multiobjetivo se desea encontrar el conjunto de valores para las

variables de decisión, las cuales optimizan el conjunto de funciones objetivo. El conjunto de variables que producen el resultado óptimo es definido como el conjunto óptimo (\bar{x}^*) . A este conjunto se le conoce como “frontera eficiente” o “frontera Pareto”, el cual contiene las posibles soluciones que el tomador de decisiones puede elegir a partir de los valores deseados de sus variables de diseño (óptimo de Pareto).

6.2.5 Definición del óptimo Pareto y su frontera

Teniendo como base la figura 6.4, un conjunto de puntos se dice que es un óptimo de Pareto si en un desplazamiento de un punto (A) a otro (B) en el conjunto, ocurre una mejora en el valor de alguna de las funciones objetivo en detrimento de alguna de las otras funciones objetivo. En la figura, el punto (C) no es parte de la frontera Pareto. Como es evidente, la frontera Pareto se encuentra sobre el borde de la región de factibilidad.

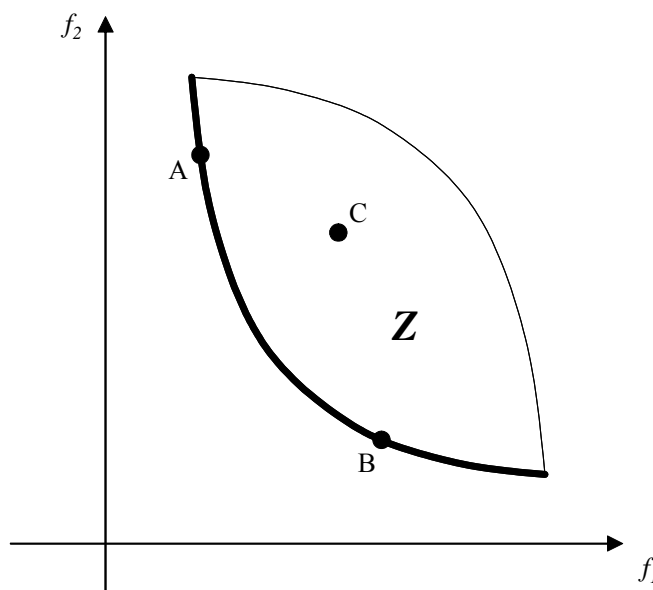


Figura 6.4
Frontera Pareto

Fuente: Deb (2001).

A partir de la figura anterior, es claro observar que el espacio de búsqueda en el contexto de múltiples objetivos puede ser dividido en dos regiones contiguas, región óptima y no óptima. El caso ilustrado es también verdadero para el caso de más de dos objetivos. Cabe señalar que en el caso de objetivos en conflicto, usualmente el conjunto de soluciones óptimas contiene más de una solución. Ante la ausencia de suficiente

información sobre el problema, la situación se torna compleja para el tomador de decisiones para elegir alguna alternativa, debido a que todas son igualmente importantes. Por este motivo, y a la luz del modelado ideal, se vuelve relevante encontrar la mayor cantidad de soluciones óptimas de Pareto como sea posible. Por todo lo anterior, Deb (2001) afirma que las metas de la optimización multiobjetivo son dos:

1. Encontrar el conjunto de soluciones más cercano a la frontera Pareto (meta de convergencia).
2. Encontrar el conjunto de soluciones tan diverso como sea posible (meta de diversidad-variabilidad en las soluciones).

6.2.6 Intercambios (*Trade-off*)

El concepto de soluciones eficientes o Pareto óptimas, conduce a otro concepto muy importante en la teoría de la decisión multicriterio: el valor de los intercambios entre dos objetivos. El intercambio entre dos objetivos mide lo que se sacrifica de un objetivo, frente a una mejora unitaria del otro. Así, se tienen dos soluciones eficientes x y x^2 el intercambio entre el j -ésimo y el k -ésimo criterio viene dado por:

$$T_{jk} = \frac{f_j(x) - f_j(x^2)}{f_k(x) - f_k(x^2)} \quad (6.6)$$

donde $f_j(x)$ y $f_j(x^2)$ representan las dos funciones objetivos consideradas. En general, el intercambio indica que cada unidad que disminuye/aumenta cierto objetivo implica una disminución/aumento de otro criterio.

6.2.7 Objetivos sin conflicto

Es importante puntualizar que existen soluciones óptimas de Pareto solamente si los objetivos están en conflicto entre sí. Si ello no es así, la cardinalidad del conjunto óptimo es uno. Esto significa que la solución mínima correspondiente a cualquier función objetivo es la misma (véase figura 6.5).

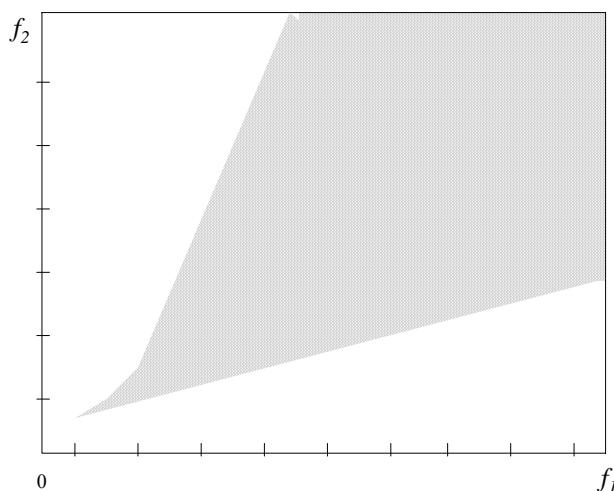


Figura 6.5
Resultado de objetivos sin conflicto

Fuente: Deb (2001).

Cabe señalar que en ciertos problemas puede ser obvio que no exista conflicto entre los objetivos. En tal virtud, el resultado del conjunto Pareto va a contener una solución óptima.

6.2.8 Vector débilmente no dominado

Adicionalmente a los términos *no dominados* y *eficiencia*, existen formas más relajadas de estos conceptos, denominados: *vector débilmente no dominado* y *vector débilmente eficiente*.

Definición 6. Dado el vector $\bar{z} \in Z$. Puede decirse que \bar{z} es débilmente no dominado, si y sólo si, no existe otro $z \in Z$, tal que $z > \bar{z}$.

Sea N^w el conjunto de todos los vectores débilmente no dominados ubicados en Z . En términos generales $N \subset N^w$. Es probable que en muchos casos $N = N^w$, sin embargo, no es difícil encontrar ejemplos donde N^w es significativamente más grande que N . La imagen inversa de los vectores de criterio débilmente no dominados son los puntos débilmente eficientes (en el espacio de las decisiones), y viceversa.

6.2.9 Vector ideal de los objetivos

Para cada uno de los k objetivos en conflicto existe una diferente solución óptima. Un vector objetivo construido con esos valores individuales óptimos constituye el vector ideal de los objetivos.

Definición 7. El $k^{\text{ésimo}}$ componente del vector ideal de los objetivos z^* es la solución máxima/mínima restringida del siguiente problema:

$$\max/\min f_k(x) \tag{6.7}$$

$$\text{sujeto a } x \in S \tag{6.8}$$

Así, la solución para la $k^{\text{ésima}}$ función objetivo es el vector de decisiones $x^{*(k)}$ con valor de la función f_k^* , el vector ideal es el siguiente:

$$z^* = f^* = (f_1^*, f_2^*, \dots, f_k^*)^T \tag{6.9}$$

En general el vector ideal de los objetivos corresponde a una solución que no existe. Esto se debe a que la solución máx/mín del problema anterior (6.9) para cada uno de los objetivos necesita no ser la misma solución. La única manera en que el vector ideal de los objetivos corresponda a una solución factible, es cuando las soluciones de todas las funciones son idénticas. En este caso los objetivos no están en conflicto entre si, y la solución mínima para cualquier función objetivo podría ser solamente la solución óptima para el problema de optimización multiobjetivo (véase figura 6.6).

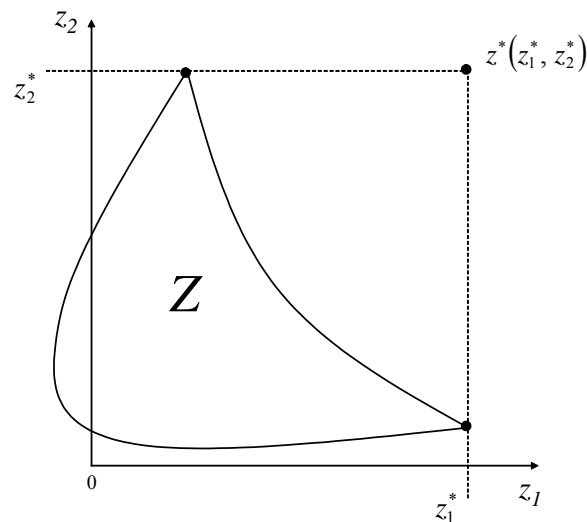


Figura 6.6
Espacio de los objetivos: punto ideal para el caso de maximización

Fuente: Steuer (1986).

Llegado a este punto, es interesante preguntar si no existe el vector ideal de los objetivos, entonces ¿Cuál usar? En muchos algoritmos, en los cuales se busca definir la frontera Pareto, el vector ideal de objetivos es utilizado como una solución de

referencia. En este sentido, es claro observar en la figura anterior la mejor solución es la más cercana al vector ideal.

6.2.10 Vector objetivo utópico

Como se pudo observar, el vector ideal denota un arreglo de la cota más baja de todas las funciones objetivo $z^*(z_1^*, z_2^*)$, lo que significa que existe al menos una solución en el espacio de búsqueda que comparte un valor idéntico con el correspondiente a la solución ideal. Algunos algoritmos requieren de una solución en la cual tengan un valor objetivo mejor que (o igual que) cualquier solución en el espacio de búsqueda. Para este propósito, el vector utópico es definido de la siguiente manera:

Definición 8. Un vector utópico z^{**} tiene cada uno de sus componentes marginales más grandes (maximizar) o más pequeños (minimizar) que el vector ideal de los objetivos, es decir: $z^{**} = z_i^* + \varepsilon_i$; o $z^{**} = z_i^* - \varepsilon_i$, respectivamente, con $\varepsilon_i > 0$, para todos los $i = 1, 2, \dots, k$.

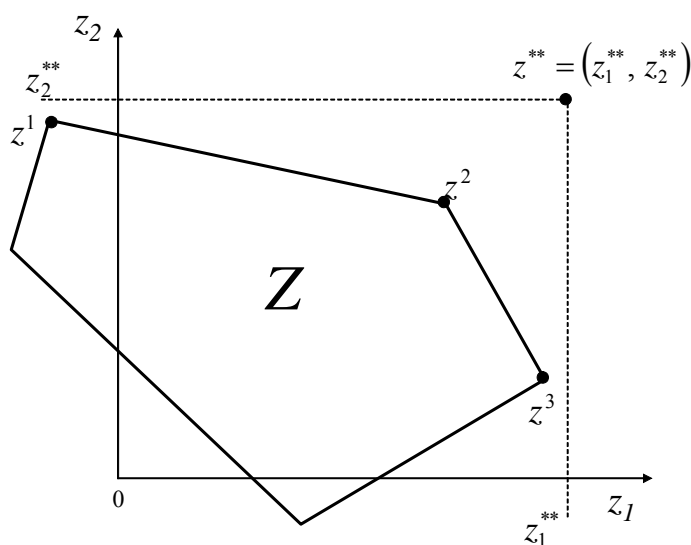


Figura 6.7
Espacio de los objetivos: vector utópico para el caso de maximización

Fuente: Steuer (1986).

En la figura anterior, $z^{**} \in R^k$ es un vector de los objetivos que esta “suspendido” alrededor de la región Z de factibilidad y estrictamente domina a todos los vectores en el conjunto no dominado N . En su forma general, también puede escribirse como:

$$z^{**} = \max/\min\{f_i(x) | x \in S\} + \varepsilon_i = z_i^* + \varepsilon_i \quad (6.10)$$

Donde z_i^* es el máximo valor (mínimo) del objetivo i sobre el conjunto no dominado y ε_i es un escalar positivo moderadamente pequeño. Un valor de ε_i aumenta z_i^{**} lo suficiente para cumplir $z_i^{**} > z_i^*$.

6.2.11 La matriz de pagos

Una matriz de pagos es de la forma:

	z_1	z_2	z_k
z^1	z_1^*	z_{21}	z_{1k}
z^2	z_{21}	z_2^*	z_{2k}
z^k	z_{k1}	z_{k2}	z_k^*

Figura 6.8
Matriz de pagos

En donde, los renglones son los vectores de los objetivos que resultan de la optimización individual. Si es preocupación la alternativa óptima, una manera de asegurar que todos los renglones de los vectores de criterios son no dominados es mediante la maximización lexicográfica de los objetivos. La maximización lexicográfica consiste en mantener fijo el primer objetivo optimizado, mientras se maximiza sucesivamente los siguientes, hasta concluir con todos.

Los z_i^* ubicados a lo largo de la diagonal principal de la matriz de pagos, son los valores máximos de los criterios para cada uno de los diferentes objetivos sobre el conjunto no dominado. Estos valores no son alcanzables por tratarse de objetivos en conflicto, sin embargo, sirven como estándares para evaluar las soluciones no dominadas. Por su parte, el valor mínimo de la i -ésima columna de la tabla de pagos es una estimación del valor del criterio mínimo del i -ésimo objetivo sobre el conjunto no dominado (N).

6.2.12 Otras definiciones relevantes

Para una mejor comprensión de los métodos que resuelven los problemas multiobjetivo, a continuación se presenta un conjunto de definiciones de los conceptos básicos más empleados:

Atributos. Son valores del tomador de decisiones relacionados con una realidad determinada. Estos valores pueden ser acotados y expresados por funciones matemáticas de las variables de decisión $f(x)$. El coste, nivel de servicio, etc., son ejemplos de atributos.

Objetivos. Dirección del cambio de un atributo. Es decir, los objetivos representan la maximización o la minimización de las funciones matemáticas que representan los atributos. Así, minimizar el coste, maximizar el nivel de servicio, etc., son ejemplos de objetivos.

Nivel de aspiración (\bar{q}). Se define como el nivel aceptable de logro para un atributo.

Meta. Es la combinación de un atributo con un nivel de aspiración. Así, “generar un coste mínimo de \$300.00” constituye un ejemplo típico de meta. En general las metas toman la forma $f(x) = b$, donde b representa el nivel de aspiración.

Restricción. Tiene la misma estructura matemática y la misma apariencia formal que las metas. Sin embargo, se diferencian en el significado que se le asigna al segundo miembro de ambas inecuaciones. Es así como en las metas, el segundo miembro corresponde a un nivel de aspiración que el tomador de decisiones desea alcanzar, pudiendo o no lograr este propósito. En el caso de las restricciones, el segundo miembro debe satisfacerse para poder tener una solución posible. Es decir, las metas permiten ciertas violaciones de las inecuaciones, situación que no es posible en el dominio de las restricciones.

Criterios. Este término comprende tres de los conceptos anteriormente definidos. Así, criterios son los atributos, objetivos o metas del tomador de decisiones, que son relevantes para un problema de toma de decisiones.

6.2.13 Métodos de solución en la programación multiobjetivo

Como ya se dijo al inicio de este capítulo, los problemas multiobjetivo plantean un conjunto de soluciones que buscan determinar los mejores valores para cada uno de los objetivos que intervienen. También se mencionó que estos tipos de problemas no están orientados a obtener una solución óptima, sino un conjunto de soluciones eficientes (óptimo de Pareto). Por ejemplo, para el caso de un problema con 5 objetivos, 50 restricciones, 100 variables fácilmente puede tener alrededor de 2000 puntos extremos eficientes (Deb, 2001). Evidentemente, dicha solución agrega mayor complejidad al problema debido a que el tomador de decisiones no sabrá cual solución elegir. Como respuesta a la problemática anterior, la atención de los investigadores se ha centrado en desarrollar métodos que resuelven los problemas multiobjetivo.

En esta sección se presenta un resumen de los métodos más divulgados para resolver problemas como el que se plantea en esta tesis. Debido a la ya complejidad del problema formulado, la revisión de estos métodos busca seleccionar uno o más de uno que permita(n) obtener soluciones eficientes de la manera más flexible posible.

6.2.14 Generación de soluciones no dominadas

A pesar de que existen muchos métodos diferentes para generar soluciones no dominadas, muchas veces el principio es el mismo: resolver un problema de optimización de un solo objetivo para genera una nueva solución o nuevas soluciones. De acuerdo con Miettinen (1999), los problemas multiobjetivo se resuelven escalando las funciones objetivo, es decir, a cada función se le asocia un número que pretende reflejar la importancia que concede el tomador de decisiones a cada uno de los objetivos. De acuerdo con este autor, la idea fundamental de las soluciones de un problema multiobjetivo, está en el hecho de que puedan ser caracterizadas como soluciones de problema de un solo objetivo. Korhonen (1998) señala que típicamente tienen objetivos originales y un conjunto de parámetros como sus argumentos. La forma de la función escalada, así como los parámetros que son usados, dependen de los supuestos planteados relacionados con la estructura de la preferencia del tomador de decisiones y su conducta.

Dos clases de parámetros son utilizados ampliamente en la optimización multiobjetivos: *i)* coeficientes de pesos para las funciones objetivo y *ii)* niveles de aspiración o referencia para las funciones objetivo. Basados en estos parámetros, existen varias maneras de especificar una función escalada. Un requisito importante es que esta función caracterice un conjunto de soluciones no dominadas.

6.2.15 Función lineal escalada

Un método clásico para generara soluciones no dominadas es el uso de la suma de pesos de las funciones objetivos, dicho método emplea la siguiente forma:

$$\text{Max } \{ \lambda f(x) \mid x \in X \} \quad (6.11)$$

Si $\lambda > 0$, entonces el vector solución x de 6.11 es eficiente, pero si $\lambda \geq 0$, entonces el vector solución es débilmente eficiente (Steuer, 1986). Usando el conjunto de parámetros $\Lambda = \{ \lambda \mid \lambda > 0 \}$, en el programa lineal de la suma de pesos puede ser caracterizado el conjunto eficiente siempre que el conjunto de restricciones sea convexo. Sin embargo, Λ es un conjunto abierto que causa dificultades en los problemas de optimización matemática. Si se utiliza $\Lambda = \{ \lambda \mid \lambda \geq 0 \}$, la eficiencia de x no puede garantizarse, y seguramente será una solución débilmente eficiente. Cuando se utiliza la suma de pesos para especificar la función escalable en problemas multiobjetivo, la solución óptima correspondiente a puntos no extremos de X nunca es única. El conjunto de soluciones optimas siempre consiste de al menos un punto extremo, o la solución es no acotada.

6.2.16 Función escalada tipo Tchebycheff

Actualmente, los métodos de solución están basados en el uso de la función propuesta por Wierzbicki (1980), la cual es conocida como la “función escalada de logro” (*achievement scalarizing function*). Esta función proyecta cualquier punto dado (factible o infactible) $\bar{q} \in \mathbb{R}^k$ dentro del conjunto de soluciones no dominadas. El punto \bar{q} es llamado punto de referencia, y sus componentes representan los valores deseados de las funciones objetivo. Estos valores son llamados “niveles de aspiración”.

La forma más simple de la función escalada de logro, es:

$$s(\bar{q}, z, w) = \max_{k \in K} \left[\frac{\bar{q}_k - z_k}{w_k} \right] \quad (6.12)$$

donde $w > 0 \in \mathfrak{R}^k$ es un vector de pesos (dado), $\bar{q} \in \mathfrak{R}^k$, y $z \in Z = \{f(x) | x \in X\}$. Minimizando $s(\bar{q}, z, w)$ sujeto a $z \in Z$, se encuentra un vector solución débilmente no dominado z^* (véase Wierzbicki, 1980). Sin embargo, si la solución es única para el problema, entonces z^* es no dominada. Si $\bar{q} \in \mathfrak{R}^k$ es factible entonces $z^* \in Z$, $z^* \geq \bar{q}$. Para garantizar que sólo se generaran soluciones no dominadas, se han utilizado formas más sofisticadas para la función de logro, por ejemplo:

$$s(\bar{q}, z, w, \rho) = \max_{k \in K} \left[\frac{\bar{q}_k - z_k}{w_k} \right] + \rho \sum_{i=1}^k (\bar{q}_i - z_i) \quad (6.13)$$

En donde $\rho > 0$. En la práctica, no puede operarse con una definición de “cualquier valor positivo”. Se tiene que usar un valor pre-especificado para ρ . Otra manera es usar la formulación lexicográfica de Korhonen y Halme (1996).

La aplicación de la función escalable (6.13) es fácil, debido a que $\bar{q} \in \mathfrak{R}^k$, el mínimo de $s(\bar{q}, v, w, \rho)$ se obtiene resolviendo el siguiente problema lineal (LP1):

$$(LP1) \quad \min \quad \varepsilon + \rho \sum_{i=1}^k (\bar{q}_i - z_i) \quad (6.14)$$

$$\text{Sujeto a} \quad x \in X \quad (6.15)$$

$$\varepsilon \geq (\bar{q}_i - z_i) / w_i, i = 1, 2, \dots, k \quad (6.16)$$

El problema (LP1) puede ser reescrito como:

$$\min \quad \varepsilon + \rho \sum_{i=1}^k (\bar{q}_i - z_i) \quad (6.17)$$

$$\text{Sujeto a} \quad x \in X \quad (6.18)$$

$$z + \varepsilon w - r = \bar{q} \quad (6.19)$$

$$z \geq 0 \text{ y } r \geq 0 \quad (6.20)$$

Un ejemplo que ilustra el uso de este tipo de funciones se describe a continuación:

Considere un problema de dos criterios con la región factible compuesta por los siguientes puntos $\{(0,0), (0,3), (2,3), (8,0)\}$, como el que se muestra en la figura siguiente:

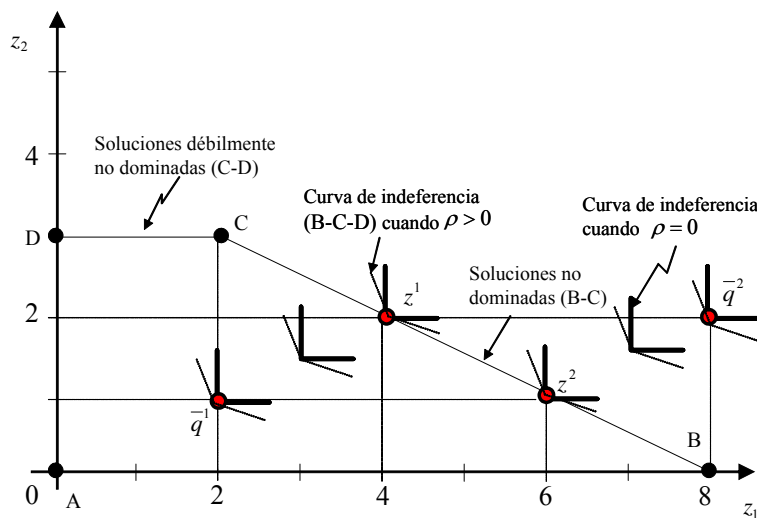


Figura 6.9
Proyección del punto de nivel de aspiración factible o infactible

Fuente: Korhonen (1998).

En la figura anterior el tomador de decisiones asume el punto $\bar{q}^1 = (2, 1)$. Utilizando el vector de los pesos $w = [2, 1]^T$, el valor mínimo de la función escalada de logro (-1) es el alcanzado en el punto $z^1 = (4, 2)$. Correspondientemente, si el nivel de aspiración es un punto infactible $\bar{q}^2 = (8, 2)$, entonces, el valor mínimo de la función escalada de logro (+1) es alcanzado en el punto $z^2 = (6, 1)$. Cuando el nivel de aspiración es dominado por un punto factible, entonces el valor de la función es siempre negativo; de otra manera, es positivo. Es cero, si el nivel de aspiración es débilmente dominado.

6.3 Clasificación de métodos de solución de problemas multiobjetivo

En términos generales, la literatura que trata el tema de los métodos de solución de problemas multiobjetivo mantiene la misma postura sobre la forma en que son clasificados. El principal criterio está basado por el momento en que el tomador de decisiones proporciona la información acerca de sus preferencias. Miettinen (1999) afirma que los juicios del TD permiten formar arreglos que varían en forma y fondo, derivados de su habilidad. La clasificación típica de este tipo de métodos es la

siguiente: a) métodos que articulan “*a priori*” las preferencias; b) métodos que no utilizan información articulada de las preferencias de los TD -Métodos sin preferencia “*a posteriori*”; y c) métodos que articulan progresivamente las preferencias del TD, mejor conocidos como “métodos interactivos” o “métodos de nivel de preferencia”.

a) Métodos que articulan “*a priori*” las preferencias. Margos y Despotis (2003) los definen como métodos donde interviene el tomador de decisiones. Korhonen (1998), establece que se distinguen por asumir que existe una función de valor v estable, pero que no se intenta evaluarla de manera explícita. El TD responde preguntas específicas, utilizadas para guiar el proceso de solución hacia un “óptimo” o “más preferido”; en cada interacción, el TD proporciona los “*trade-off*” o “tasas de intercambio” entre los objetivos de forma local.

b) Métodos que no utilizan información articulada de las preferencias de los TD - Métodos sin preferencia “*a posteriori*”. Margos y Despotis (2003), los definen también como los métodos de simulación hipotética del TD. Es decir, no toman en cuenta la opinión del tomador de decisiones. Una vez que se resuelve el problema, las soluciones son presentadas al TD, el cual puede aceptar o relajar la solución. Por esto último, también son conocidos como “Métodos de Generación de Soluciones” (Caballero, *et al*, 2003).

c) Métodos que articulan progresivamente las preferencias del TD, mejor conocidos como “métodos interactivos” o “métodos de nivel de preferencia”. Korhonen (1998) señala que son métodos donde no se asume la existencia de una función de valor v estable, ni implícita o explícita. Atendiendo a su forma de operar, Stewart (1992) los clasifica de acuerdo a cómo son modeladas las preferencias del decisor, ya sea considerando funciones de valor o niveles de aspiración. Las funciones de valor trabajan por medio de la medición del intercambio (*trade-off*) que el centro de decisión otorga a cada alternativa; por su parte, los niveles de aspiración del TD generalmente localizados sobre la región factible, son proyectados vía la minimización de la llamada función escalable de logro.

De acuerdo con esta clasificación, a continuación se presenta un resumen de cada uno de los métodos más relevantes y divulgados.

6.3.1 Técnicas que requieren "a priori" una definición de las preferencias por parte del tomador de decisiones

En esta sección se describen los métodos de la función de valor, de orden lexicográfico, programación por metas, el método que combina a estos dos últimos, denominado programación por metas lexicográficas; y al final, se presenta el método de los intercambios de valor y las tasas marginales de sustitución.

6.3.1.1 Método de la función de valor (utilidad)

En este método el tomador de decisiones debe ser capaz de ofrecer una correcta y explícita forma matemática de la función de valor ($U : R^k \rightarrow R$) que represente sus preferencias globalmente. La intención de dicha función es proporcionar un orden en el espacio de los criterios. En tal virtud, el problema a resolver se escribe de la siguiente manera:

$$\text{Maximizar } U(f(x)) \tag{6.21}$$

$$\text{Sujeto a: } x \in S \tag{6.22}$$

el cual puede ser resuelto con el uso de algún método de optimización de un solo objetivo.

Aparentemente la función de valor parece ser un método simple, sin embargo, su dificultad reside en especificar matemáticamente la expresión de la función de utilidad del TD y que verdaderamente represente la totalidad de sus preferencias. En particular, estas dos precondiciones son difíciles de modelar (Miettinen, 1999). Por otro lado, existen condiciones que las preferencias del TD deben cumplir para que una función de valor pueda ser definida. El TD debe, por ejemplo, ser capaz de especificar preferencias consistentes. Por lo anterior, no necesariamente va existir una función de valor que imponga un orden total en el conjunto de los vectores de criterios factibles del TD. En la literatura se reconoce que el supuesto de orden total es frecuentemente contrario al objetivo intuitivo del TD, por lo tanto, es bastante probable llevar a menos esa selección ideal (véase Polak y Payne, 1976). Con respecto al problema que se plantea en esta tesis, la incertidumbre de la función objetivo sobre el nivel de servicio de transporte puede representar un obstáculo más para el TD, toda vez que resultará imposible establecer el grado de preferencia sobre el coste, o viceversa. Este hecho debe tenerse

en mente en lo que sigue, sobre todo en aquellos métodos en los que se asume la existencia de una función de valor o que es considerada implícita.

6.3.1.2 Método de orden lexicográfico

En el método de orden lexicográfico, el TD debe arreglar sus funciones objetivo de acuerdo a su importancia absoluta. Este orden significa que el objetivo más importante es infinitamente más conveniente que el menos importante. Después de ordenarlos, la función objetivo primordial es minimizada sujeta a las restricciones originales. Si el problema tuvo una solución única, esta es la solución del problema de optimización multiobjetivo total. De otra manera, la segunda función objetivo más importante es minimizada, y el primer objetivo se agrega como restricción. Esta nueva restricción garantiza que la función objetivo más relevante preserva su valor óptimo. Nuevamente, si el problema tuvo una solución única, esta será la solución del problema original. De otra manera, el proceso continúa en secuencia al orden definido para los objetivos.

De acuerdo al orden lexicográfico, las funciones objetivo pueden representarse como un arreglo de la más importante f_1 hasta la menos importante f_k . Por lo tanto, el problema de optimización lexicográfico puede ser escrito como:

$$\text{Lex minimizar } f_1(x), \dots, f_k(x) \quad (6.23)$$

$$\text{Sujeto a: } x \in S \quad (6.24)$$

La justificación que permite el uso del método de orden lexicográfico es su simplicidad y el hecho de que las personas usualmente toman decisiones sucesivas. Sin embargo, para el problema planteado en esta tesis, este método tiene varios inconvenientes: *i*) debido a los nuevos paradigmas de competitividad empresarial, el coste ha dejado de ser un elemento decisivo y paulatinamente ha sido reemplazado por el nivel de servicio al cliente, provocando que el TD puede tener dificultades en establecer sus funciones objetivo en un orden absoluto de importancia. *ii*) asimismo, si el TD asume al coste como principal objetivo, ello puede significar que la función objetivo del nivel de servicio de transporte no sean tomada en consideración del todo, y a la inversa. *iii*) sí la función objetivo más “importante” tuvo solución única, los otros objetivos no tiene influencia alguna en la solución. *iv*) este método no permite el

intercambio (“*trade-off*”) de la importancia de las funciones objetivo; es decir, no es posible un pequeño incremento de la función objetivo aparentemente más “importante” por un mayor reducción de la función menos “importante”. Evidentemente, este tipo de operaciones no es atractivo para el TD y por supuesto para el problema que se pretende resolver.

6.3.1.3 Programación por metas (Charnes y Cooper, 1961)

La programación por metas constituye, quizás, la primera aproximación a la toma de decisión de un contexto de objetivos múltiples efectuada a través de la programación matemática. Dicho modelo permite abordar el problema que significa la existencia de una serie de objetivos en conflicto, los cuales son incluidos como restricciones. Dado que en la mayor parte de los casos resulta imposible satisfacer todos los objetivos, la función objetivo del modelo consiste en minimizar las desviaciones positivas o negativas que hay entre el nivel de logro de cada una de las metas, y el correspondiente nivel de aspiración del TD.

Por ejemplo, si se desea minimizar el coste de abastecimiento de productos, ello representará una función objetivo; pero si se desea que dicho coste sea menor que “ x ” cantidad, dicha función se transforma en una meta, es decir, en una restricción. Para problemas de minimización, las metas son de la forma: $f(x) \leq \bar{q}_i$.

Después de haber especificado el nivel de aspiración \bar{q}_i , la siguiente tarea es especificar por arriba y por abajo los valores de las funciones objetivo con respecto a los niveles de aspiración. Para ello, es necesario establecer las variables de desviación $\delta_i = \bar{q}_i - f_i(x)$. Las variables de desviación δ_i pueden tener valores positivos o negativos, dependiendo del problema. Generalmente se representa como la diferencia de dos variables positivas, estos es: $\delta_i = \delta_i^- - \delta_i^+$. Para lograr el nivel de aspiración, las funciones objetivo pueden escribirse de la siguiente manera:

$$f(x) + \delta_i^- - \delta_i^+ = \bar{q}_i, \quad \forall i \tag{6.25}$$

En donde δ_i^- es un valor de desviación negativo y δ_i^+ es un valor de desviación positivo, por arriba y por abajo respecto a los niveles de aspiración (es válido decir $\delta_i^- \cdot \delta_i^+ = 0, \forall i$).

Una vez redefinido el problema multiobjetivo, considerando la forma definida en la ecuación 6.25 de las funciones objetivo, se tienen diversas formas de proceder para resolver dicho problema.

En general, este método parece ser una buena opción para resolver el problema del caso en estudio, sin embargo, la imposibilidad intrínseca de establecer algún tipo de prioridad o meta sobre las funciones de valor, resulta difícil de lograr toda vez que el TD no tiene la más mínima idea de la región de factibilidad. El establecimiento de metas claras, por lo tanto, podría acarrear mayor incertidumbre sobre las mejores soluciones.

6.3.1.4 Programación por metas lexicográficas

En el método anterior, todas las metas son incluidas simultáneamente en una función objetivo agregada (función de logro), que minimiza la suma de todas las desviaciones existentes entre las metas y sus niveles de aspiración. Las desviaciones se ponderan con la importancia relativa que cada una de las metas tiene para el centro decisor.

La programación por metas lexicográficas requiere que se determinen previamente las prioridades, asociando a cada objetivo, o grupo de objetivos, un nivel de prioridad Q_j excluyente, de tal manera que si una prioridad Q_i es preferida a otra prioridad Q_j , lo seguirá siendo independiente de que se asocie a la prioridad Q_i cualquier multiplicador por grande que éste sea. Es decir, esta variante exige que el decisor sea capaz de dividir el conjunto de sus metas en distintas prioridades, asignando pesos excluyentes a las metas situadas en diferentes prioridades.

Definidas las prioridades, se procede a construir la función de logro (función objetivo), la cual está formada por un vector ordenado cuya dimensión coincide con el número de niveles de prioridad establecidos. Los componentes de dicho vector representan las variables de desviación que hay que proceder a minimizar para conseguir que los objetivos, clasificados dentro de esa prioridad, se aproximen lo más posible a los niveles de aspiración.

En el caso de la programación por metas lexicográficas, el centro decisor define dos prioridades: la primera incluye la meta uno y el logro de ésta es inconmensurablemente preferido al logro de las metas incluidas en la segunda prioridad. Si se deseará asimilar a este caso las ideas contenidas en la programación por metas ponderadas, se tendría que establecer que la primera meta está por infinito con respecto a las de la segunda prioridad.

La programación por metas es ampliamente utilizada, y es un método de solución popular para resolver problemas multiobjetivo. Una de las razones es que dado una meta, parece ser una manera fácil de tomar decisiones. Sin embargo, independientemente de que no tengan un efecto directo como en el método de los pesos a priori, la especificación de pesos o el establecimiento de un orden lexicográfico de las metas, puede tornarse difícil. En el contexto del modelo propuesto, esto último es realmente verdadero. La prioridad del coste sobre el nivel de servicio de transporte, o al revés, no resulta una manera fácil de observar las consecuencias o su efecto. De cualquier modo, el TD debe ser cuidadoso con la selección de los niveles de aspiración para efecto de que la solución Pareto pueda ser garantizada. La selección correcta puede ser difícil para el TD quién no conoce la región factible. Una manera es analizando los rangos del conjunto óptimo de Pareto, o al menos el vector ideal de los criterios. En general, por la estructura que presenta, este método no es reconocido como método apropiado para ser utilizado en decisiones de intercambio (*trade-off*) de las funciones objetivo.

6.3.1.5 Método de los intercambios de valor y las tasas marginales de sustitución (SWT, *Surrogate Worth Trade-off*)

Este método, que fue propuesto por Haimes y Hall en 1974, se basa en la incorporación como criterio de decisión: los niveles de los objetivos, los intercambios y las tasas marginales de sustitución. En general, este es el método que menos consenso concita a la hora de ser incorporado en algunas de las categorías de clasificación. Mientras que algunos autores lo incluyen en este grupo, otros lo hacen en el grupo de los que requieren una definición progresiva de las preferencias. Este conflicto se origina porque incorpora características de ambos métodos. En este caso se clasificó en este grupo debido a que, independientemente de que requiere información durante el proceso de búsqueda, también lo requiere "*a priori*".

Este algoritmo comienza obteniendo un conjunto de puntos eficientes mediante la resolución del siguiente programa:

$$\max z_r(x) \quad (6.26)$$

$$\text{Sujeto a: } x \in S \quad (6.27)$$

$$z_q(x) \geq L_q \quad (6.28)$$

$$z_k(x) = L_k \quad (6.29)$$

$$k \neq q, r \quad (6.30)$$

Se logra un conjunto de puntos eficientes por medio de variaciones paramétricas de L_q . A partir de esta información se obtienen los valores de intercambios, así como la tasa marginal de sustitución (TMS). Una vez obtenidos, se constituye un indicador (W_i) que relaciona ambos valores de la siguiente forma:

$$W_i = TMS/\text{valores de intercambio} \quad (6.31)$$

Luego, se procede a determinar los puntos de indiferencia para un objetivo (Z_i), definidos como: $W_i Z_i = 0$

Una vez conocido el valor de Z_i , se incorpora como restricción, a la vez que se optimiza el objetivo con el que se evalúa. El resultado de este programa constituye la mejor solución. En general, la metodología propuesta en este método parece un adelanto a los métodos interactivos que más tarde se discuten, ya que difunde la idea de hacer más participativo al TD. Para resolver el problema que se plantea en esta tesis, dicha idea se retoma desde ese punto de vista (metodológico), asumiendo la posibilidad de generar un conjunto de soluciones eficientes que sirvan de punto de referencia al TD sobre la región de factibilidad, para establecer los niveles de aspiración.

6.3.1.6 Conclusión final sobre esta clase de métodos

Por el tipo de modelos propuestos, y las necesidades planteadas al inicio de este capítulo, se da por hecho que ninguno de los métodos antes descritos pueda ser utilizado para resolver el problema planteado. La imposibilidad específica de establecer algún tipo de prioridad o metas sobre las funciones de valor, resulta difícil de alcanzar toda vez que no se tiene la más mínima idea de la región de factibilidad. Lo anterior,

básicamente se debe a la gran cantidad de diferentes productos que abastece el proveedor a su cliente y los diversos modos de transporte que se utilizan, haciendo prácticamente imposible conocer el rango de solución de manera aproximada. Por otro lado, debido a la estructura que presentan estos métodos, se observa que no son los más apropiados para ser utilizado en decisiones de intercambio (“*trade-off*”) de las funciones objetivo. Esto último, descarta la aceptación directa de esta clase de métodos al modelo propuesto, ya que se pretende que el TD tenga una mayor participación en la definición de la solución final.

6.3.2 Técnicas que requieren "*a posteriori*" una definición progresiva de las preferencias por parte del centro decisor

Por lo que respecta a este tipo de métodos, en esta sección se presentan tres de ellos: el de los pesos ponderados, de las restricciones y el del criterio global. Esta clase de métodos, realmente son los que menos se difunden en la literatura científica, no obstante que son la base de otras más complejas.

6.3.2.1 Método de los pesos (Zadeh, 1963)

Fue uno de los primeros métodos propuestos (Zadeh en 1963). El método de los pesos es otro procedimiento que permite generar puntos eficientes del espacio de los objetivos. Trata de transformar el programa multiobjetivo en un programa con un solo objetivo para poder utilizar el método Simplex y generar así dichas soluciones. Básicamente, se conforma de una función que agrupa y suma los diferentes objetivos, asociados (ponderándolos) con sus respectivos pesos relativos. Para obtener diferentes puntos eficientes, estos pesos relativos se van modificando. En cada interacción se resuelve el problema con el nuevo objetivo resultante. La formulación matemática es la siguiente:

$$(PP) \quad \text{Minimizar} \quad \sum_{i=1}^k w_i f_i(x) \quad (6.32)$$

$$x \in S \quad (6.33)$$

$$\text{donde} \quad w_i \geq 0 \quad \text{para toda } i = 1, \dots, k; \text{ y} \quad (6.34)$$

$$\sum_{i=1}^k w_i = 1 \quad (6.35)$$

En general, todas las soluciones obtenidas por este método son Pareto óptimo, siempre y cuando todos los coeficientes de los pesos sean positivos, o si la solución es única. La debilidad del método es que no todas las soluciones pueden ser encontradas, al menos que el problema sea convexo. Esto significa que en un problema de este tipo, una solución $x^* \in S$ es un óptimo de Pareto si existe un vector w ($w_i \geq 0, i = 1, \dots, k; \sum_{i=1}^k w_i$), tal que x^* es una solución del problema de los pesos (PP). La figura 6.10 a continuación, ilustra este hecho.

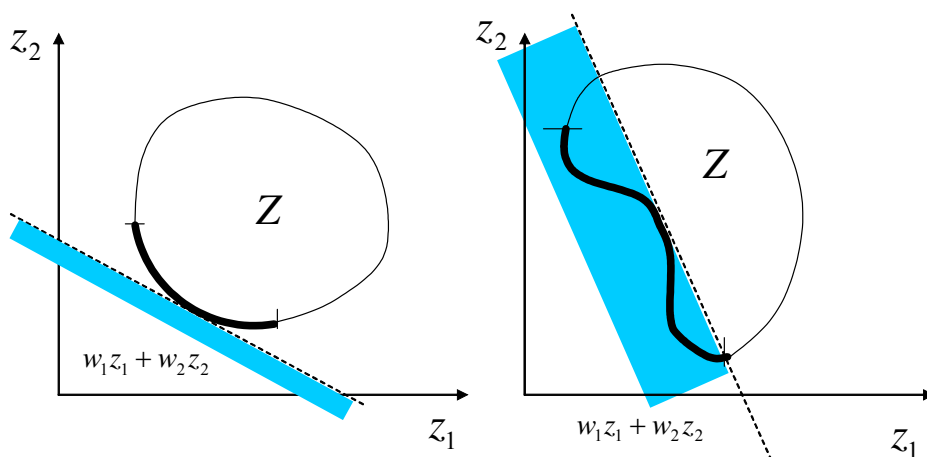


Figura 6.10
Método de los pesos con problemas convexos y no convexos

El método de los pesos puede ser utilizado para que el TD especifique un vector de pesos que represente sus preferencias o su información. En este caso, el problema de la suma de los pesos puede ser considerado como una función de valor (utilidad). Este método puede ser extendido a una forma interactiva o no, es decir, el operador del modelo está en posibilidades de simular las preferencias del decisor asignando los pesos correspondientes hasta generar todas las soluciones (si esto se logra). Un punto importante en la aplicación de este método, es que las funciones objetivo deben ser normalizadas o escaladas sobre el valor de los criterios, con la finalidad de lograr que sean de la misma magnitud. Hobbs (1986) sugiere que en lugar de usar la importancia relativa, los factores de los pesos deben representar la tasa con la cual, el TD intercambia sus preferencias sobre las funciones objetivo.

De acuerdo con Bandte (2000), este método no conduce siempre a una representación completa del conjunto eficiente, garantizando solamente una aproximación del mismo. Por otro lado, las diferentes combinaciones de pesos w_i

pueden llevar a un mismo punto extremo, con lo que el esfuerzo informático realizado no aporta nueva información. Alguno de los problemas PP puede resultar infactibles. Si la solución del problema PP es única, entonces es una solución eficiente. Este método requiere la realización de $rp - 1$ corridas de computador con $r =$ número de pesos w ensayados.

Este método puede utilizarse conjuntamente con el método de las restricciones, obteniéndose el llamado método híbrido de las ponderaciones y restricciones, o con alguna otra técnica para complementar el cuadro de soluciones eficientes o frontera Pareto. Para el caso particular de esta tesis, este método parece ser una buena opción ya que no requiere de ningún tipo de transformación debido a que permite generar las suficientes soluciones eficientes para delinear la frontera Pareto de los modelos propuestos, dando la oportunidad al TD de visualizar la región de factibilidad, y con ello tener una idea más clara para definir sus preferencias.

6.3.2.2 Método de las restricciones

El método de la restricción consiste básicamente en transformar el problema multiobjetivo en un problema con un único objetivo (a maximizar o minimizar). Eso permite utilizar los métodos de resolución convencionales como el Simplex. En esencia, se selecciona un objetivo del problema y los otros se introducen en el conjunto de restricciones, fijando arbitrariamente una cota superior (valores de lado derecho) a cada nueva restricción (una por objetivo). El problema a resolver es de la forma siguiente:

$$\max f_h(x) \tag{6.36}$$

$$\text{sujeto a } f_j(x) \leq L + \varepsilon \quad \text{para toda } j = 1, \dots, k, \quad j \neq h \tag{6.37}$$

$$x \in S \tag{6.38}$$

Marglin (1967), demostró que la solución de este nuevo problema también proporciona una solución eficiente. Para un problema con dos objetivos que deben ser maximizados al mismo tiempo, primeramente se resuelve el problema con el primer objetivo $f_{h=1}(x) = z_1^1$, y una vez obtenido el valor de las variables de decisión, se calcula el valor del segundo objetivo $f_{j=2}(x) = z_1^2$.

A partir de lo anterior, se resuelve el problema con el segundo objetivo $f_{h=2}(x) = z_2^2$, y una vez obtenido el valor de las variables de decisión, se calcula el valor del primer objetivo $f_{j=1}(x) = z_2^1$. De esta manera, se dispone de dos puntos eficientes del espacio de objetivos, los cuales conforman la matriz de pagos o también, puntos extremos.

El siguiente paso es escoger una de las funciones objetivo (por ejemplo, $f_{j=2}(x)$ y ponerla como restricción. Supóngase que ε_2 corresponde al valor de $f_{j=2}(x)$ cuando se maximiza $f_{h=2}(x)$. Si se añade la restricción $f_{j=2}(x) \geq L_2$ y se resuelve el problema, se obtiene la misma solución para $f_{h=1}(x)$. Pero si se añade la siguiente restricción $f_{j=2}(x) \geq L_2 + \varepsilon$ (donde ε es un valor positivo relativamente pequeño), y se resuelve el problema, es posible que la nueva solución de $f_{h=1}(x)$ sea inferior o igual, pero obviamente nunca superior, ya que al añadir una nueva restricción, se está reduciendo el espacio de decisiones factible. Por lo tanto, a medida que se incrementa el valor de ε y se resuelven las nuevas instancias del problema, se van generando nuevas soluciones de $f_{h=1}(x)$.

El proceso se detiene cuando el lado derecho de la restricción $L_2 + \varepsilon$, alcanza el valor óptimo de $f_{j=2}(x)$. El problema reside en encontrar el valor de ε adecuado para poder generar el máximo número de puntos eficientes en el espacio de los objetivos. En otras palabras, se trata de encontrar el número adecuado de problemas lineales a resolver.

En la figura 6.11, se presenta el efecto de los diferentes valores de ε para la función objetivo $f_{j=2}(x)$, asumiendo que $f_{h=1}(x)$ es minimizada. El conjunto Pareto óptimo se ilustra con línea gruesa. Para el caso en que el nivel de ε^1 sea muy ajustado, la región de factibilidad se convierte en un conjunto vacío de soluciones eficientes. Por el contrario, para el caso en que el nivel sea ε^4 , no se restringe la región y por lo tanto, el punto z^4 (en la figura), se obtendrá como una solución. De acuerdo con la definición de eficiencia, este punto es un óptimo de Pareto. Correspondientemente, para la cota

superior ε^3 , el punto z^3 es una solución de Pareto óptimo. De igual manera, el punto z^2 es un óptimo de Pareto para la cota ε^2 .

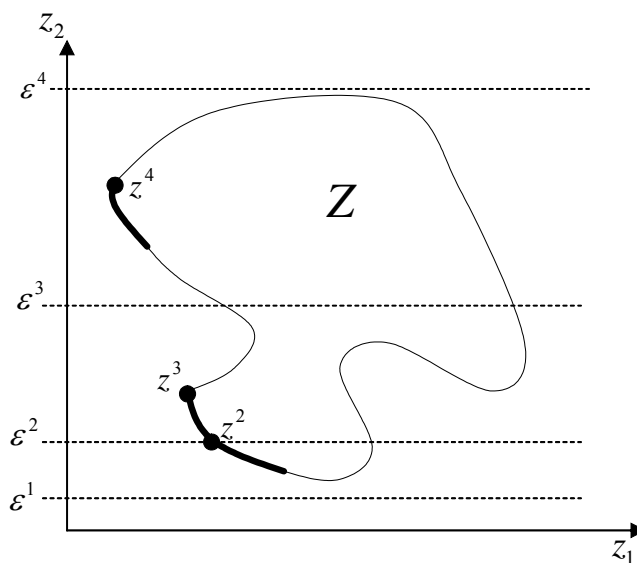


Figura 6.11
Diferentes cotas superiores en el método de las restricciones

A partir del efecto del valor del parámetro ε , el método destaca los siguientes dos aspectos: *i*) se observa el intercambio de valor (*trade-off*) entre las funciones objetivo, y *ii*) teóricamente genera soluciones eficientes en cada interacción. Sin embargo, de acuerdo con Miettinen (1999), dada la dificultad de establecer el parámetro ε , no puede asegurarse que se obtendrán todas las soluciones óptimas de Pareto. La razón está dada por el hecho de que un incremento de ε , aplicado al lado derecho de la restricción, puede ser superior al valor del segundo objetivo en un punto eficiente.

En resumen, este método tiene la desventaja de establecer un parámetro ε adecuado. No obstante, los componentes del vector ideal pueden ser utilizados para ayudar a especificarlos. Es decir, puede definirse $\varepsilon = z_j^* + \varepsilon_j$, donde ε_j es algún número relativamente pequeño positivo, el cual puede ser alterado. Finalmente, un aumento del número de restricciones equivale a un aumento de tiempo de cómputo.

6.3.2.3 Método del criterio global (Zeleny, 1973)

Este método, algunas veces también es llamado “*programación compromiso*”, fue propuesto por Zeleny (1973). En general, la distancia entre el punto de referencia y la región de factibilidad de los criterios es minimizada. El analista selecciona el punto de

referencia y la métrica de medición de la distancia. Todas las funciones objetivo son consideradas igualmente importantes. Aquí se examina la situación cuando el vector de criterio ideal es utilizado como un punto de referencia, y la métrica- L_p , como la unidad de medición. En este caso, el problema a resolver es:

$$(MCG) \quad \text{minimizar} \left(\sum (f_i(x) - z_i^*)^p \right)^{1/p} \quad (6.39)$$

$$\text{sujeto a: } x \in S \quad (6.40)$$

A partir de la definición del vector de criterios ideal z^* , se reconoce que $f_i(x) \geq z_i^*$ para $i = 1, \dots, k$ y toda $x \in S$. Esto significa que no son necesarios valores absolutos. Por otro lado, el exponente $1/p$ puede ser excluido. Los problemas con o sin el exponente $1/p$ son equivalentes para $1 \leq p \leq \infty$, ya que el modelo MCG es una función creciente del problema correspondiente sin el exponente. Si $p = \infty$, la métrica es también llamada métrica de Tchebycheff siendo el problema es de la forma:

$$(MCG1) \quad \text{minimizar} \max_{1 \leq i \leq k} [f_i(x) - z_i^*] \quad (6.41)$$

$$\text{sujeto a: } x \in S \quad (6.42)$$

En este caso, el modelo MCG1 se distingue como no diferenciable. Sin embargo, ello no impide que pueda ser transformado en dicha forma y en su lugar obtener un problema como el siguiente:

$$(MCG2) \quad \text{minimizar} \min \alpha \quad (6.43)$$

$$\text{sujeto a: } \alpha \geq (f_i(x) - z_i^*), \quad \text{para toda } i = 1, \dots, k \quad (6.44)$$

$$x \in S \quad (6.45)$$

donde x y $\alpha \in R$ son variables.

Por lo anterior, la solución obtenida depende del valor que se escoja para p . Normalmente se utiliza $p = 1, 2, \infty$ (véase Steuer, 1986). Un ejemplo de la relación de las métricas con la frontera Pareto óptimo se aprecia en la figura 6.12. Cuando el valor de p se incrementa, el problema de minimización no lineal se vuelve más difícil de resolver.

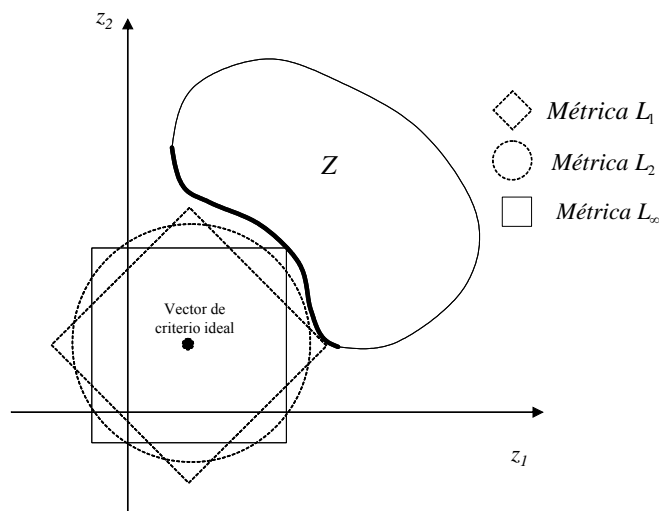


Figura 6.12
Diferentes métricas

La técnica del criterio global es un método simple que se utiliza cuando el objetivo es obtener una solución donde no existe una esperanza especial. Las propiedades de las métricas implican que si las funciones objetivo no son normalizadas en todo caso, dicha función objetivo obtiene mayor importancia del valor del vector de criterio ideal que esta ubicado muy cerca de la región de factibilidad de los criterios. Las soluciones obtenidas con la métrica L_p ($1 \leq p \leq \infty$) son garantía de ser óptimo Pareto. Si la métrica es L_∞ , puede ser una solución óptimo de Pareto débil.

6.3.2.4 Conclusión general de estos métodos

En la práctica, los métodos sin información “*a posteriori*” son incapaces de llegar a una solución final de un problema de decisión de tamaño mediano, ya que genera un conjunto de soluciones muy amplio entre las que el decisor le resulta muy difícil elegir. Generalmente se utilizan para una primera fase de toma de contacto, para permitir al decisor y analista conocer más a fondo el problema; por tanto, necesitan de otras técnicas para resolverse.

6.3.3 Técnicas que requieren una definición progresiva de las preferencias por parte del tomador de decisiones

Para Steuer (1986), el futuro de la programación multiobjetivos es su aplicación interactiva. Afirma que en procedimientos interactivos, la exploración se conduce sobre la región de factibilidad de las alternativas de una solución óptima o satisfactoria cercana al óptimo. Sostiene que la retroalimentación entre el hombre y el modelo

permite al tomador de decisiones aprender más sobre su problema. Continúa diciendo que el tomador de decisiones podrá apreciar mejor el rango total de posibilidades en su región factible, y comparar los objetivos uno contra otro. Esta orientación, permite al tomador de decisiones identificar las mejores soluciones y reconocer una solución final de acuerdo con sus expectativas.

De entrada, puede decirse que dichos comentarios parecen encajar muy bien al objetivo que se persigue en la elección de un método que resuelve a los modelos propuestos en esta tesis. Los procedimientos interactivos son caracterizados por etapas de toma de decisiones alternados con fases de cómputo. Generalmente se establece un patrón y una acumulación de repeticiones de los pasos que forman un ciclo. Específicamente, llevan a cabo el cálculo para definir qué es lo mejor (procesar datos o ejecutar algoritmos), y permiten al tomador de decisiones decidir sobre sus preferencias (tomar los mejores a partir de juicios basados en nueva información).

En cada una de las interacciones se genera una o un grupo de soluciones que es analizado. Como resultado de dicho análisis, el tomador de decisiones ingresa información para el procedimiento de solución. Los métodos más destacados de este tipo se describen brevemente a continuación.

6.3.3.1 Método STEP o STEM (Benayoun, de Montgolfier, Tergny y Larichev, 1971)

Este método, que también aparece en la literatura con el nombre de STEM, fue propuesto por Benayoun, *et al*, en 1971. Conceptualmente puede ser aplicado a problemas continuos y discretos, así como también a problemas lineales y no lineales. Utilizando los conceptos de la *matriz de pagos*, solución ideal y desviación de otro conjunto de la solución ideal, las etapas del método STEM son las siguientes.

Etapa 1. Encontrar la “*matriz de pagos*” STEM que resuelve el problema (original), dando para cada una de las funciones objetivo $k = 1, 2, \dots, p$, como si el problema fuese de una sola función objetivo.

Etapa 2. Encontrar una solución “*no dominada*” la cual esté lo más cercana en el sentido minmax (es decir, la mejor solución de la peor).

Etapa 3 El tomador de decisiones compara el conjunto de soluciones no dominadas encontradas en la etapa 1 con la solución ideal de la matriz de pagos

Etapa 4. Las etapas 2 y 3 son repetidas hasta que cada uno de los valores de los objetivos son satisfactorios para el TD, lo cual significa que la mejor solución compromiso ha sido encontrada, o que se decide que no existe una solución satisfactoria para el problema.

El procedimiento general se detalla en la figura 6.13 a continuación.

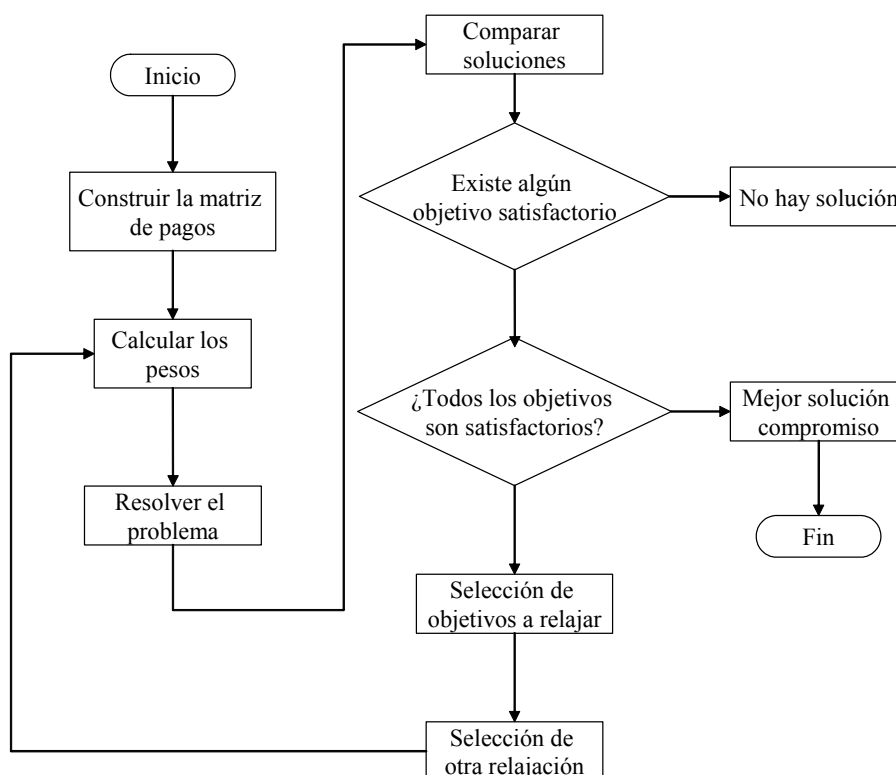


Figura 6.13
Diagrama de flujo del método STEP

Fuente: Steuer (1986).

En resumen, este método restringe el conjunto de oportunidades en función de las preferencias manifiestas por el decisor. Cada solución se obtiene mediante la minimización de la distancia de Tchebycheff respecto al vector ideal sobre el conjunto de oportunidades restringido. Las preferencias del decisor se reflejan mediante la relajación de algún objetivo satisfactorio, que permitirá mejorar algún otro objetivo aún no satisfactorio.

Precisamente, el método STEM es considerado como un procedimiento *ad hoc*, porque permite establecer cuáles objetivos han sido relajados y por cuanto. No obstante, puede considerarse como un método semi-estructurado que genera una secuencia de soluciones mejoradas. Sin embargo, no existe garantía que va converger a una solución óptima.

El método STEM fue diseñado para utilizar un software convencional. Después de la construcción de la *matriz de pagos*, se requiere una interacción para lograr su optimización (paso 1). Adicionalmente al caso lineal, este método puede también ser aplicado a programas multiobjetivo no lineales y enteros para cualquier tamaño, que puede ser adaptado para emplear software convencional para resolver problemas de un solo criterio.

A simple vista, este método parece ser una buena opción para resolver los modelos propuesto para la coordinación de inventarios y la elección del modo de transporte, sin embargo, resulta poco atractivo para su manipulación debido a la gran cantidad de variables de decisión que surgen a partir de la combinación (y aumento) del número de productos, períodos y modos de transporte ($n \times T \times m$). La complejidad del modelo impone por si mismo la búsqueda o diseño de un método flexible y manejable para el TD y para el analista.

6.3.3.2 Método de Geoffrion (GDF) (Geoffrion-Dyer-Feinberg, 1972)

Este método fue publicado por Geoffrion, Dyer y Feinberg en 1972: supone que el tomador de decisiones tiene una función de utilidad compuesta por p funciones objetivo. El problema multiobjetivo es reducido a un problema de un objetivo, cuya función es la de maximizar dicha función de utilidad sujeta a las restricciones del problema.

$$\text{Maximizar } u(x) = U(f(x)) \quad (6.46)$$

$$\text{Sujeto a: } x \in S \quad (6.47)$$

Pero debido a que no se conoce explícitamente la función, se utiliza el algoritmo de Frank Wolfe para ir buscando una dirección ascendente en la utilidad del decisor. En cada iteración, el procedimiento obtiene una solución factible que maximiza la dirección del gradiente de la función de utilidad, evaluado en la solución anterior. Es en el

cálculo de este gradiente donde es necesario que el decisor proporcione los niveles de intercambio (*trade-off*) entre los objetivos. Sin embargo, la característica fundamental del algoritmo de Frank-Wolfe, radica en el hecho de considerar una aproximación lineal local de la función de utilidad del decisor. Así, los valores suministrados por el decisor proporcionan los pesos de cada uno de los objetivos en la función de utilidad que, vista localmente, adopta una forma lineal. Por tanto, estos valores no son más que los coeficientes de dicha función respecto a los objetivos.

De esta manera, el primer paso de este método es tomar una solución cualquiera y determinar las ponderaciones que serán usadas en la función objetivo del programa que intenta determinar la dirección que tiene el problema. Una vez obtenida esta solución, se recomienda evaluar distintos valores de objetivos. Luego, se obtiene la solución que domina, y a partir de ésta, se plantea otro programa para determinar la nueva dirección. Interactivamente se obtienen soluciones que se acercan a los valores considerados como óptimos para el problema. La figura 6.14, muestra el diagrama de flujo de este algoritmo.

Comentarios del método:

1. A pesar de la aceptable fundamentación teórica del método, no es muy aceptado en la práctica. Una de las principales desventajas es que la solución que se obtiene no necesariamente es un óptimo de Pareto. De hecho, es común que varias de las soluciones mostradas al tomador de decisiones no sean óptimas de Pareto. Esta situación es una gran desventaja para ser elegido para ayudar al TD a resolver el problema planteado en esta tesis. La complejidad misma del modelo para coordinar los inventarios, exige que en cada interacción se encuentren soluciones factibles sobre la frontera Pareto.

2. Opuesto al método STEM, el método GDF es un procedimiento que no es adaptable a cualquier problema. Existen muchos supuestos que el problema debe satisfacer para que el método trabaje y pueda converger.

3. Las tasas marginales de sustitución son esenciales en el modelado de la función de valor, y para muchos TD les resulta molesto y difícil especificarlas. Aun es más

difícil dotarlas de consistencia y con una adecuada tasa de intercambio en cada interacción

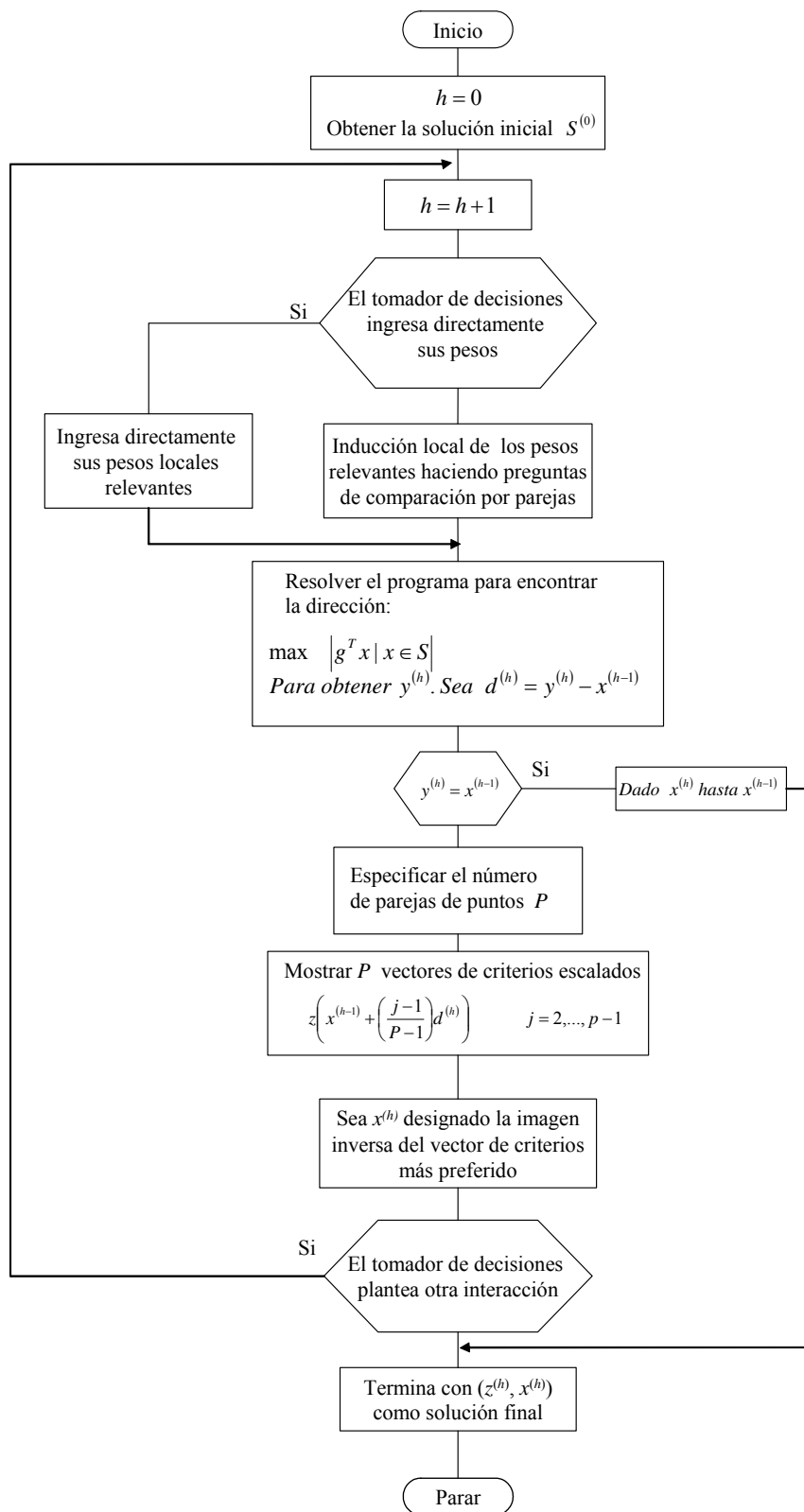


Figura 6.14
Diagrama de flujo del método GDF

Fuente: Steuer (1986).

6.3.3.3 Método Z-W (Zionts-Wallenius, 1976)

El método de Zionts y Wallenius (Z-W), publicado en 1976, puede ser considerado como uno de los métodos interactivos más importantes; sin embargo, debido a su gran complejidad en el proceso de cálculo, no es uno de los que goza de mayor aceptación práctica. Además, los supuestos con los que parte este método son bastante imperiosos: el problema ha de ser multiobjetivo lineal y además supone la existencia de una función de utilidad cuya forma es la de suma ponderada de las funciones objetivo.

En efecto, este método parte del supuesto de que la función objetivo es cóncava (a maximizar), y el conjunto de restricciones tiene forma convexa. Las funciones objetivo y las restricciones no lineales deben ser previamente linealizadas.

El método opera interactivamente preguntando al TD acerca de sus puntos extremos o vectores de intercambio (*trade-off*). A partir de las respuestas, partes del espacio del vector de los pesos $\Lambda = \left\{ \lambda \in R^k \mid \lambda_i > 0, \sum_i^k \lambda_i = 1 \right\}$ son eliminadas. El proceso continúa hasta que ha sido reducido a una región suficientemente pequeña para identificar la solución final. La figura 6.15 muestra el diagrama de flujo de este algoritmo.

Los principales inconvenientes de este método, es que los tomadores de decisiones generalmente se sienten incómodos cuando se les pregunta sobre el vector de intercambio. En ocasiones, no se tiene los elementos de juicio suficientes para poderlos determinar. Por otro lado, el método puede reducir rápidamente el espacio de los vectores de pesos, sin embargo, no converge a una solución final no extrema (véase Steuer, 1986).

En términos generales, los modelos multiobjetivo propuestos para resolver el problema de la coordinación de inventarios planteado en esta tesis, parece que cumple cabalmente con todas las condiciones que exige este método en particular, lo que significa que puede ser una buena opción para resolver el problema. Sin embargo, la complejidad de dichos modelos y la complejidad de esta técnica podría ser un problema delicado para obtener soluciones de una manera flexible.

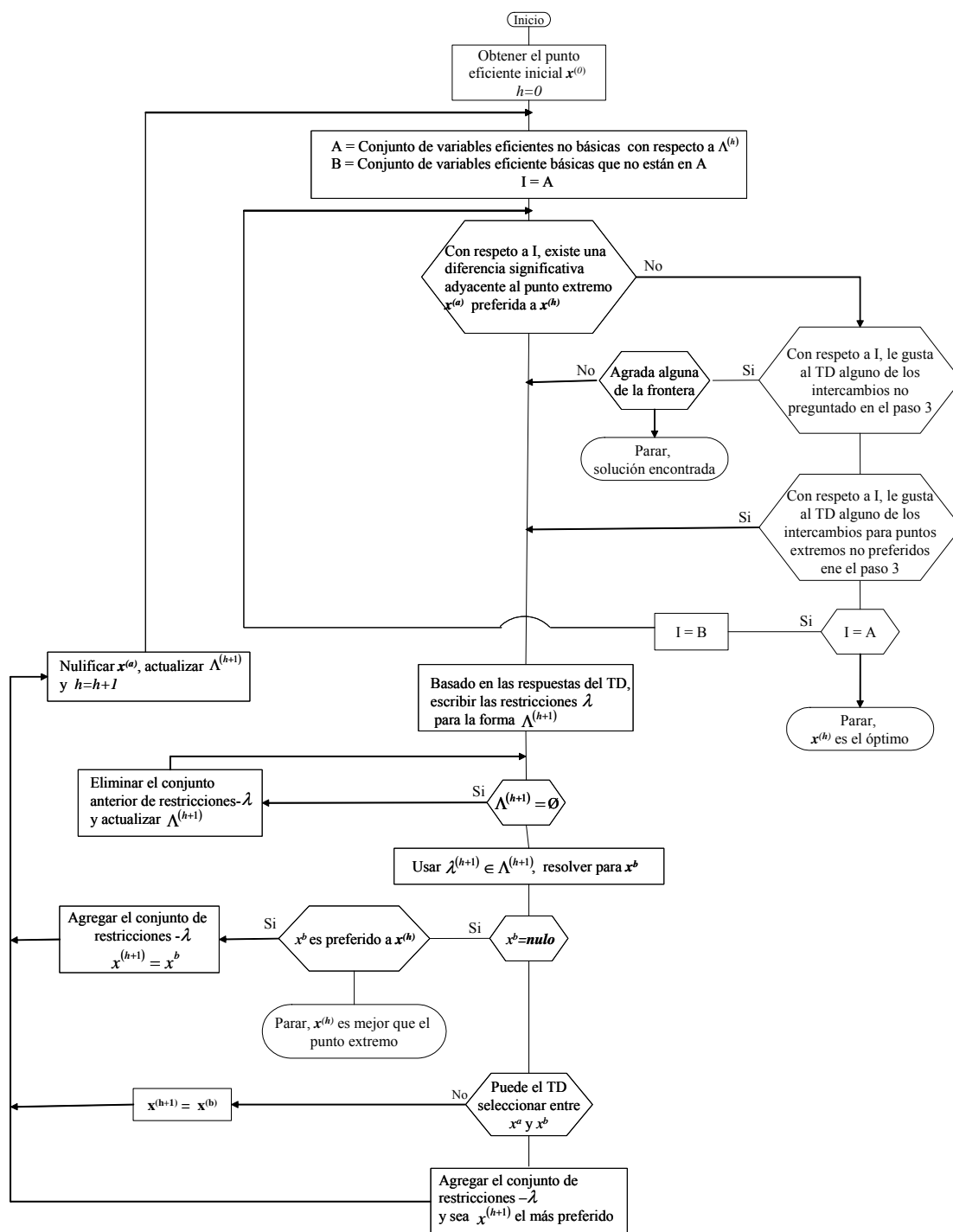


Figura 6.15
Método interactivo Z-W

Fuente: Steuer (1986).

6.3.3.4 Método SEMOPS (*Sequential Multiobjective Problem Solving*)

Este método propuesto por Monarchi, *et al.* (1973), está diseñado para encontrar la mejor solución compromiso para problemas lineales de múltiples objetivos. En este método se utiliza una función compuesta adimensional. El problema es transformado de un punto de vista multiobjetivo a otro de un solo objetivo. La ventaja de este método es que la función objetivo compuesta elimina la necesidad de especificar valores de pesos. En su lugar, utiliza la gestión de metas para alcanzar los objetivos considerados. Las metas, por lo tanto, se convierten en los valores en los que el tomador de decisiones quisiera lograr para los objetivos. Se considera que las metas pueden ser evaluadas de manera más realistas por los tomadores de decisiones que los pesos de un sistema de preferencias. Según Ghiassi, *et al.* (1984) y Miettinen (1999), se ha propuesto y aplicado la siguiente función compuesta:

$$U = \sum_{k=1}^p w_k y_k(x) U \tag{6.48}$$

donde:

U = función objetivo compuesta

x = variable de decisión

$y_k(x)$ = transformación adimensional del objetivo Z_k

w_k = un peso adimensional asociado con el objetivo Z_k

k = el número de objetivos considerados, $k = 1, \dots, p$

Los pesos w_k adimensionales, y los objetivos transformados $y_k(x)$, están definidos por:

$$w_k = \frac{A_k - N_k}{M_k - N_k} \quad \text{y} \quad y_k(x) = \frac{Z_k(x) - N_k}{M_k - N_k} \tag{6.49}$$

A_k = valores de las metas deseadas para los objetivos Z_k , con rango de compromiso: $N_k \leq A_k \leq M_k$

A_k , representa los valores de las metas que los tomadores de decisiones personalmente desean alcanzar. Generalmente, estos valores son conocidos como nivel de aspiración. Estos difieren de la rigidez del concepto de meta, y están abiertas a revisión durante el proceso de solución.

El rango del compromiso está definido por (N_k, M_k) , donde M_k es el valor máximo, y N_k , generalmente es el valor mínimo que el $k^{\text{ésimo}}$ objetivo puede tomar dentro del conjunto de objetivos no dominados. M_k y N_k pueden ser obtenidos de los valores del conjunto no dominado del problema por inspección visual.

A continuación se presenta la secuencia de pasos que permiten aplicar este método.

1. Obtener el conjunto de soluciones no dominadas
2. Seleccionar los niveles de aspiración
3. Formulación de la función compuesta
4. Determinación del conjunto: definición de la función objetivo compuesta y sus restricciones
5. Determinar la solución para un nivel de aspiración dado
6. Evaluar los resultados por parte del tomador de decisiones
7. Tomar decisiones de aumentar o reducir los niveles de aspiración originales
8. Continuar con las interacciones mientras no encuentre una solución satisfactoria
9. Detener el proceso cuando se encuentre una solución que satisfaga los requerimientos del tomador de decisiones, o cuando ninguna de las soluciones no dominadas se considere satisfactoria

Como el método STEM, el método SEMOP es un método interactivo que al compararse con otras técnicas generalmente no se clasifica como uno de los mejores debido a la cantidad de información y tiempo requerido por los responsables. Su poca versatilidad lo hace ser poco utilizado por los practicantes. La principal desventaja que presenta este método para ser instrumentado, es que necesita el programa especial ADBASE (que fue diseñado por Steuer en 1974), para lograr construir la función compuesta que resuelve el problema. Para el caso específico del modelo propuesto, este método resulta un tanto complicado por hecho de la gran cantidad de variables de decisión que surgen de la combinación entre los productos involucrados, periodos y modos de transporte. Una ventaja es que el TD, al menos, ya conoce la región de factibilidad, lo que puede permitir establecer sus niveles de aspiración.

6.3.3.5 Método de intercambio del valor de las sustituciones (ISWT) (Chankong y Haimes, 1978 y 1983)

Este método, propuesto por Chankon y Haimes, 1978, 1983, es una extensión del método de Haimes y Hall (1974). En esta sección se presenta la versión interactiva. El

método de las restricciones es parte fundamental de este método. En términos generales, la idea es maximizar la función de valor subyacente (conocida implícitamente). Las opiniones de los TD, acerca de las tasas de intercambio (*trade-off*) en la solución actual, ofrecen una dirección de búsqueda. El tamaño del paso, ha tenerse en cuenta dentro de la dirección de búsqueda, es investigado por medio de la solución de varios problemas de restricciones y preguntas al TD para que seleccione la solución más satisfactoria para continuar.

El proceso específico del método ISWT, pueden ser descrito en las siguientes cuatro etapas:

1. Seleccionar la función de referencia f_i para ser minimizada y proporcionar las cotas superiores para las otras funciones objetivo. Haciendo $h = 1$.
2. Resolver el problema de las restricciones para obtener el conjunto Pareto de soluciones óptimas x^h . La información de la tasa de intercambio es obtenida de los multiplicadores de Karush-Khun-Tucker.
3. Preguntar la opinión del tomador de decisiones con respecto a la tasa de intercambio en z^h correspondiente a x^h .
4. Si algún criterio es satisfecho, parar con x^h como solución final. De otra manera, actualizar la cota superior de las funciones objetivo con la ayuda de las respuestas obtenidas en el paso 3 y resolver diversos problemas de restricciones (para determinar un apropiado tamaño de paso). Dar al tomador de decisiones la oportunidad de seleccionar la alternativa más preferida. Denotar el correspondiente vector de decisión por x^{h+1} y hacer $h = h + 1$. Regresar al paso 3.

En general el papel que juega el TD es bastante fácil para entender este método. Sin embargo, la complicación de dar las respuestas depende de qué variación del método se emplea. Esto es, el TD le puede ser difícil proporcionar valores consistentes durante el proceso de decisión. No es el caso que ocupa esta tesis, pero si existe un mayor número de funciones objetivo, el TD tiene que especificar muchos valores de sustitución adecuados en cada iteración. Evidentemente, la tasa de pago juega un papel importante en este método, y es porque el TD tiene que entender el concepto de intercambio (*trade-off*). Por supuesto, se debe tener mucha precaución para entender y formular las preguntas acerca de dicha tasa. La ventaja de este método es que todas las

soluciones analizadas son óptimas de Pareto. La desventaja es que existe muchos diferentes supuestos que deben ser satisfechos para que el algoritmo garantice el trabajo. Eso puede dificultarse (o ser laborioso) en el problema planteado en esta tesis para asegurar que los supuestos sean cumplidos.

6.3.3.6 Método interactivo de Tchebycheff (Steuer y Choo, 1983)

El método de Tchebycheff, propuesto por Steuer y Choo en 1983, es un método muy importante de generación de soluciones. La idea del procedimiento de Tchebycheff es muestrear una secuencia progresiva de pequeños subconjuntos del conjunto N no dominado hasta obtener la solución final (una solución suficientemente cercana al óptimo inicial para terminar con el proceso de decisión). En cada iteración se le muestra al TD un conjunto de soluciones para que éste elija una de ellas; la particularidad de dichas soluciones es que están cada vez más próximas.

Los supuestos básicos del método no son nada restrictivos, aunque en principio se desarrolló para problemas lineales. De hecho, este método es aplicable a problemas multiobjetivo no lineales no convexos, con la única exigencia de que el conjunto de objetivos $f(x)$, debe ser acotado en \mathbb{R}^k . Si bien es un método de generación de soluciones, comparte con los métodos interactivos de niveles de referencia el hecho de que en cada iteración, minimiza una distancia entre el espacio de los criterios y el vector ideal del problema. La función a minimizar es:

$$\max_{i=1\dots k} [w_i (f(x) - z_i^{**})], \quad (6.50)$$

donde, $w \in W = \left\{ w \in \mathbb{R}^k \mid 0 < w_i < 1, \sum_{i=1}^k w_i = 1 \right\}$

El nombre del método viene dado porque utiliza la métrica Tchebycheff con pesos aumentada para calcular dicha distancia, asegurando que el punto obtenido tras la minimización de esa distancia sea un punto eficiente. Por lo tanto, el método de Tchebycheff es un vector de pesos de reducción del espacio.

El método inicia con el establecimiento de un vector utópico por debajo del vector ideal. Luego, la distancia de la región factible al vector utópico es minimizada resolviendo el siguiente problema:

$$(MIT) \quad \text{Lex minimizar} \quad \max_{i=1 \dots k} [w_i (f_i(x) - z_i^{**})] \sum_{i=1}^k (f_i(x) - z_i^{**}) \quad (6.51)$$

$$\text{Sujeto a: } x \in S \quad (6.52)$$

La notación anterior significa que si el problema min-max no tienen una única solución, la suma de términos es minimizada sujeta a los puntos obtenidos. Con la métrica Tchebycheff, diferentes soluciones son obtenidas con la diferentes vectores de pesos en la métrica. El funcionamiento del problema MIT es descrito en la figura 6.16 para un problema de dos funciones objetivo. La línea gruesa, nuevamente representa el conjunto óptimo de Pareto.

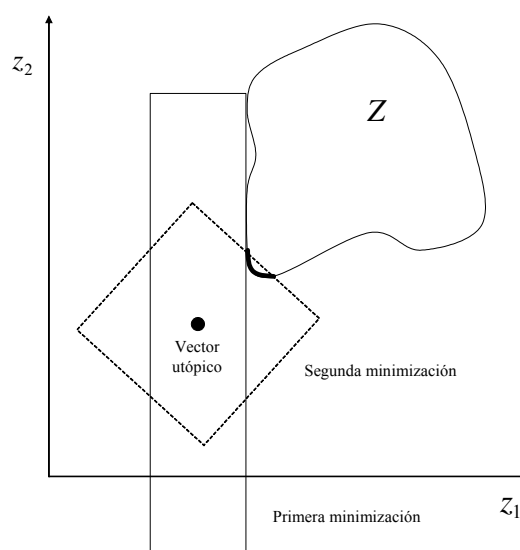


Figura 6.16
Problema lexicográfico de los pesos Tchebycheff

Fuente: Ehrgott (2002).

El problema MIT tiene un contorno de forma rectangular como se muestra en la figura (indicado con línea continua delgada) cuyos vértices caen a lo largo de la línea emanada desde \$z^{**}\$ en la dirección \$\left(\frac{1}{w_1}, \frac{1}{w_2}, \dots, \frac{1}{w_k} \right)\$. Cuando se minimiza MIT, se genera un contorno que está más cercano a \$z^{**}\$ e intercepta \$Z\$. Si este problema no tiene única solución, es decir, existen varias soluciones factibles sobre el contorno óptimo que intercepta a \$Z\$, entonces algunas de éstas no pueden ser óptimo de Pareto. En este caso, el término de la sumatoria es minimizado, sujeta a obtener los puntos para determinar cual de las soluciones está más cercana a \$z^{**}\$ de acuerdo a la métrica \$L_1\$ (línea discontinua en la figura). De esta manera, se obtiene solución única.

A partir de las P soluciones resultantes de los vectores de criterios, el TD selecciona la más preferida, designándola como $z^{(1)}$. Alrededor del vértice T y el vector w definido por z^{**} y $z^{(1)}$, donde:

$$w_i = \frac{1}{|z_i^{**} - z_i^{(1)}|} \left[\sum_{j \in K} \frac{1}{|z_j^{**} - z_j^{(1)}|} \right]^{-1} \quad (6.53)$$

el intervalo (ℓ_i, μ_i) es ajustado de acuerdo al esquema dado en Steuer y Choo (1983) para formar $\Lambda^{(2)}$. Luego, las soluciones $2P$ del vector w son generados a partir de $\Lambda^{(2)}$ y del programa lexicográfico de Tchebycheff. Nuevamente, a partir de las P soluciones, es seleccionado la $z^{(2)}$. Se ajusta el intervalo (ℓ_i, μ_i) para formar $\Lambda^{(3)}$, y así sucesivamente.

Una característica de este método es que es fácil de entender por el tomador de decisiones. No necesita realizar nuevos conceptos o especificar respuestas numéricas, como los métodos ISWT y GDF. La facilidad de la comparación de alternativas depende de P y del número de funciones objetivo. Sin embargo, la capacidad del tomador de decisiones juega un papel relevante. También es positivo que la todas las alternativas son óptimos de Pareto. La debilidad de este método es que requiere de consistencia en las respuestas del TD. Otra dificultad es que requiere de una gran cantidad de cálculos en cada interacción y muchos de los resultados son descartados. Para grandes y complejos problemas, en donde la evaluación de los funciones objetivo puede resultar laboriosa, este método no es una opción real.

6.3.3.7 Método de Dirección de Referencia para problemas de programación múltiples objetivos lineal entero (MOILP). (Vassilev y Narula, 1993)

Este método resuelve solamente problemas de programación entera de múltiples objetivos de manera interactiva. En cada iteración encuentra una solución (débil) eficiente. Durante el proceso, el tomador de decisiones suministra un punto de referencia en cada iteración y no se requiere de algún software especial para su solución. La estructura específica de este método se describe a continuación.

Definición. La dirección de referencia está definida por la diferencia entre el punto de referencia dado por el TD y la última solución del problema.

Sea f_k un valor arbitrario de la función objetivo del problema MOILP, y \bar{f}_k denota el nivel de aspiración. Además, sea:

$$H = \{k \in K \mid \bar{f}_k > f_k\} \quad (6.54)$$

$$L = \{k \in K \mid \bar{f}_k < f_k\} \quad (6.55)$$

$$E = \{k \in K \mid \bar{f}_k = f_k\} \quad (6.56)$$

donde $K = H \cup L \cup E$. Para encontrar la siguiente solución de MOILP, se resuelve el siguiente programa de un solo objetivo:

$$(A) \quad \max_{x \in X} s_1(x) = \max_{x \in X} \min_{k \in H} (f_k(x) - f_k) / (\bar{f}_k - f_k), \quad (6.57)$$

$$\text{sujeto a: } f_k(x) \geq \bar{f}_k + \alpha(\bar{f}_k - f_k), \quad k \in L \quad (6.58)$$

$$f_k(x) = \bar{f}_k, \quad k \in E, \quad (6.59)$$

donde α es un parámetro no negativo, y $f_k, k \in K$ es el valor de la función objetivo encontrada en la última solución.

La función objetivo del problema (A), maximiza la diferencia más pequeña entre la solución actual $f_k(x)$ y la última solución f_k , para todas las funciones objetivos $k \in H$. Es decir, trata de colocar lo más lejos posible la solución actual. Cuando se resuelve (A), los valores de las funciones objetivo que pertenecen al conjunto H crece donde aquellas que pertenecen al conjunto L pueden decrecer.

De esta manera, se completa la proyección de la dirección de referencia sobre la superficie eficiente. Claramente la función objetivo (6.57) existe solamente si $\bar{f}_k > f_k$ para al menos un $k, k \in K$. Esto también implica que el punto de referencia $\bar{f}_k, k \in K$, no tiene que ser dominado por la solución previa de MOILP. Dependiendo de lo elevado de los valores de \bar{f}_k y $f_k, k \in K$, los conjuntos H, L y E son creados para definir el problema (A) de un solo objetivo.

Cuando los conjuntos H y L son vacíos, entonces la solución óptima de (A), obtenida para varios valores de α , son soluciones débilmente eficientes para MOILP. Es útil notar que la última solución de MOILP es una solución factible para (A); esto es importante cuando se resuelve (A) por medio de un algoritmo exacto. Más aún, las

soluciones factibles de (A) caen cerca de la superficie eficiente de MOILP, la cual permite utilizar un algoritmo aproximado para resolver (A).

Debido a que la función objetivo de (A) no es lineal, no existe un algoritmo estándar que resuelva este problema de programación lineal entera. Sin embargo, el problema puede ser establecido como el siguiente MOILP:

$$(B) \quad \max y \quad (6.60)$$

$$\text{sujeto a: } f_k(x) - (\bar{f}_k - f_k)y \geq f_k, \quad k \in H \quad (6.61)$$

$$f_k(x) \geq \bar{f}_k + \alpha(\bar{f}_k - f_k), \quad k \in L \quad (6.62)$$

$$f_k(x) = \bar{f}_k, \quad k \in E \quad (6.63)$$

$$x \in X \quad (6.64)$$

$$y \geq 0 \quad (6.65)$$

donde y es un escalar.

Cuando (A) no tiene solución, entonces el problema (B) tampoco tiene solución. Esto se debe al hecho de que ambos problemas tienen las mismas restricciones. Cuando (A) tiene una solución, entonces (B) tiene solución y los valores óptimos de sus funciones objetivos son iguales. Debido a que los problemas (A) y (B) son equivalentes, la solución óptima de (B) es una solución débilmente eficiente de MOILP.

La solución de (A) (o equivalente (B)) es una solución débilmente eficiente de MOILP. Sin embargo, si se desea obtener una solución eficiente, entonces puede resolverse el problema siguiente para un solo objetivo:

$$(C) \quad \max_{x \in X} T(x) = \max_{x \in X} \left\{ \min_{k \in H} \frac{f_k(x) - f_k}{\bar{f}_k - f_k} + \beta \sum_{k \in K} (f_k(x) - f_k) \right\} \quad (6.66)$$

$$\text{Sujeto a: } f_k(x) \geq \bar{f}_k + \alpha(\bar{f}_k - f_k), \quad k \in L \quad (6.67)$$

$$f_k(x) = \bar{f}_k, \quad k \in E \quad (6.68)$$

en donde β es un número positivo muy pequeño arbitrario.

El problema (C) puede ser reducido al siguiente problema de programación lineal mixto entero:

$$(D) \quad \max \left(y + \beta \sum_{k \in K} y_k \right)$$

$$\text{sujeto a} \quad f_k(x) - f_k = y_k, \quad k \in H \quad (6.69)$$

$$f_k(x) - f_k = -y_k, \quad k \in L \quad (6.70)$$

$$f_k(x) - (\bar{f}_k - f_k)y \geq \bar{f}_k, \quad k \in H \quad (6.71)$$

$$f_k(x) - (\bar{f}_k - f_k)\alpha \geq \bar{f}_k, \quad k \in L \quad (6.72)$$

$$f_k(x) = \bar{f}_k, \quad k \in E \quad (6.73)$$

$$x \in X \quad (6.74)$$

$$y, y_k \geq 0, \quad k \in K \quad (6.75)$$

Se observa que es un método muy práctico y sencillo. Su implementación no complica más el modelo. Permite obtener soluciones no dominadas a partir de los niveles de aspiración del TD. Proyecta soluciones dominadas y no dominadas a la región de factibilidad a la frontera Pareto. Este método es compatible con los modelos propuestos debido a que estos últimos están estructurados en el contexto de la programación lineal entera. La ventaja del modelo D es que todas las soluciones son óptimas de Pareto, es decir, todas se encuentran ubicadas en la frontera eficiente.

6.3.3.8 Método NIMBUS (*Nondifferentiable Interactive Multiobjective Bundle-based Optimization System*)

NIMBUS, presentado por Miettinen y Mäkelä (1999), es un método interactivo de optimización multiobjetivo diseñado para ser capaz de operar con funciones no convexas y no diferenciales. La idea de NIMBUS es que el TD examine en cada iteración h los valores de las funciones objetivo, calculadas en la última solución x^h y que fije su posición con respecto a las siguientes cinco categorías:

1. Debe disminuir ($i \in I^<$)
2. Debe disminuir por debajo de alguno nivel de aspiración z_i^h ($i \in I^{\leq}$)
3. Son satisfactorios en el momento ($i \in I^=$)
4. Son permitidos aumentar por arriba del alguna cota superior ε_i^h ($i \in I^>$)
5. Son permitidos cambios libres ($i \in I^{\circ}$)

Donde $I^< \cup I^{\leq} \cup I^= \cup I^> \cup I^{\circ} = \{1, \dots, k\}$

La anterior, significa que el tomador de decisiones es cuestionado para que indique (por medio de la clasificación), que tipo de solución podría ser más satisfactoria para él.

El TD, por tanto, es cuestionado para que especifique sus niveles de aspiración \bar{z}_i^h para $i \in I^{\leq}$ que satisfaga $\bar{z}_i^h < f_i(x^h)$ y la cota superior ε_i^h para $I^>$, tal que $\varepsilon_i^h > f_i(x^h)$. La diferencia entre las clases $I^<$ y I^{\leq} es que las funciones en $I^<$ son minimizadas tanto como sea posible, mientras que las funciones I^{\leq} sólo hasta el nivel de aspiración. Cabe mencionar que las funciones en una clasificación son llamadas “funciones de aspiración”.

En términos generales, la actividad de clasificación es el eje principal del método NIMBUS. Sin embargo, el TD puede cambiar el orden de importancia dentro de las clases $I^<$ e I^{\leq} con coeficientes de pesos positivos opcionales w_i con suma igual a uno. Si el tomador de decisiones no desea especificar algún coeficiente de los pesos, puede definirse que $w_i^h = w_j^h = 1$ para $i \in I^<$ y $j \in I^{\leq}$.

En NIMBUS, el TD tiene mayor libertad para especificar los cambios deseados en el valor de los criterios. Por supuesto, no todas las clases deben emplearse simultáneamente.

El proceso continúa con la transformación del problema original multiobjetivo, ya sea en un nuevo problema multiobjetivo u otro de un solo objetivo, formando un subproblema alterno, llamados vector y escalar, respectivamente. En la figura 6.17, se presenta el diagrama de flujo del algoritmo de este método.

Un importante factor de este método es que la solución final siempre es un óptimo de Pareto debido a la estructura del algoritmo. Adicionalmente, todos los puntos intermedios son al menos débilmente óptimos de Pareto, los cuales pueden ser proyectados en el conjunto Pareto óptimo.

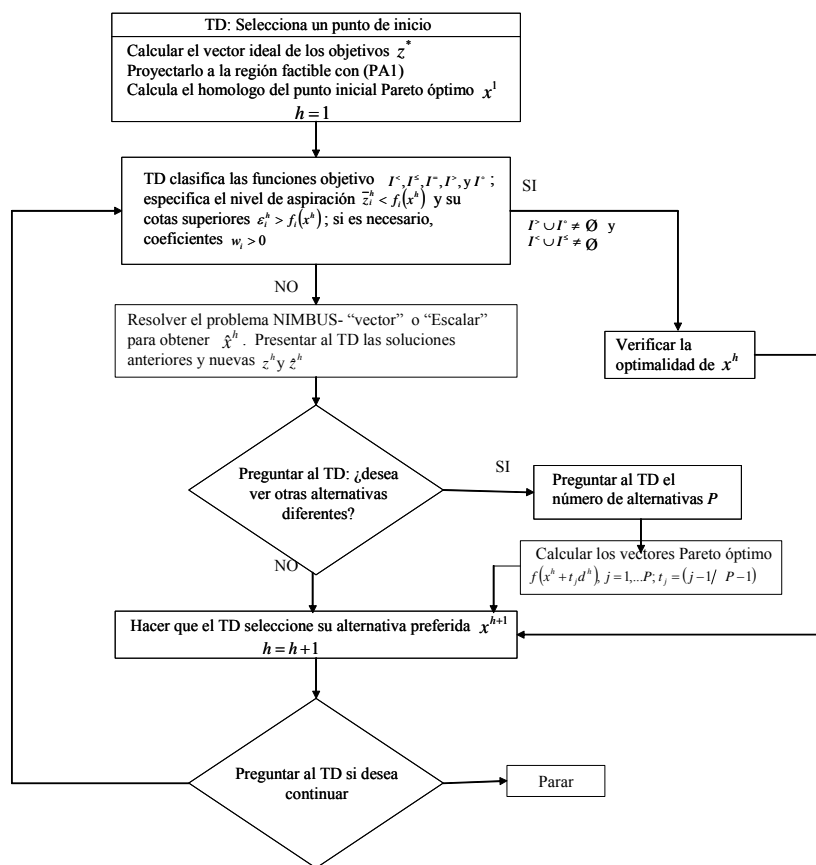


Figura 6.17
Diagrama de flujo del algoritmo NIMBUS

Fuente: Miettinen y Mäkelä (1999).

Por lo anterior, el TD es libre de moverse alrededor del conjunto óptimo de Pareto. El TD puede también extraer soluciones indeseables para una mayor consideración. Naturalmente, el tomador de decisiones no tiene que emplear las cinco clases de funciones si está inconforme con algunas de ellas. Sin embargo, es importante proporcionar diferentes maneras de actuar del TD. La clasificación de las funciones y la especificación de los parámetros apropiados no necesariamente tienen éxito como en otros métodos basados en la clasificación. La razón es que también las soluciones intermedias pueden ser examinadas y así, una mayor información del problema puede ser obtenida. El única “desventaja” que se podría encontrar de este método, es que su aplicación depende de la utilización de un software especializado que opera con derechos reservados.

6.4 Perfil del algoritmo general de los métodos de solución de MOLP

El estudio general de los métodos que resuelven problemas de programación multiobjetivo permite observar diferentes maneras de abordar el tema; las diversas

metodologías empleadas para resolver el problema; los supuestos aceptados para dar cabida a los problemas del mundo real; la identificación de los parámetros e información necesaria que da causa a la aplicación de los métodos, y sobre todo, permite distinguir que en el fondo, dichos métodos buscan resolver los problemas multiobjetivo con mayor precisión y fácil aplicación.

En general, los métodos que resuelven los problemas multiobjetivo llevan a cabo la exploración o análisis alrededor de la región factible para identificar el conjunto de puntos no dominados. Específicamente, los procedimientos se caracterizan por aquellos que requieren de información del TD a priori, de manera interactiva y a posteriori. Para el primer y tercer caso, el TD tiene una intervención parcial durante el proceso del ejercicio. Para el caso de los métodos interactivos, el TD tiene una participación mucho más activa, que incluso orienta el curso de los resultados.

En efecto, los métodos interactivos están caracterizados por fases de toma de decisiones que se alternan con fases de cómputo. Este patrón se establece repetidamente hasta su terminación. En cada interacción, una solución o grupo de soluciones se generan para proceder a sus análisis. Como resultado de dicho análisis, el TD proporciona información actualizada acerca de sus preferencias al procedimiento de solución en forma de valores, conocidos éstos como “parámetros de control” (por ejemplo, preferencia con pesos, vectores de niveles de aspiración, vectores λ con intervalos de pesos, vectores con componentes para ser crecientes/ decrecientes o fijos, etc.), definidos de acuerdo con el procedimiento utilizado.

Como se pudo corroborar en los métodos antes descritos, y de acuerdo con Steuer (2000), la mayoría de los métodos interactivos que han sido propuestos, virtualmente ejercen más o menos el siguiente algoritmo general (véase figura 6.18).

1. Obtención de parámetros de control.
2. Optimización de uno o más problemas de programación matemática para probar el conjunto no dominado.
3. Análisis de los resultados del vector de los criterios.
4. Modificación del vector de los criterios obtenidos y su iteración a la luz de lo observado en la última solución.

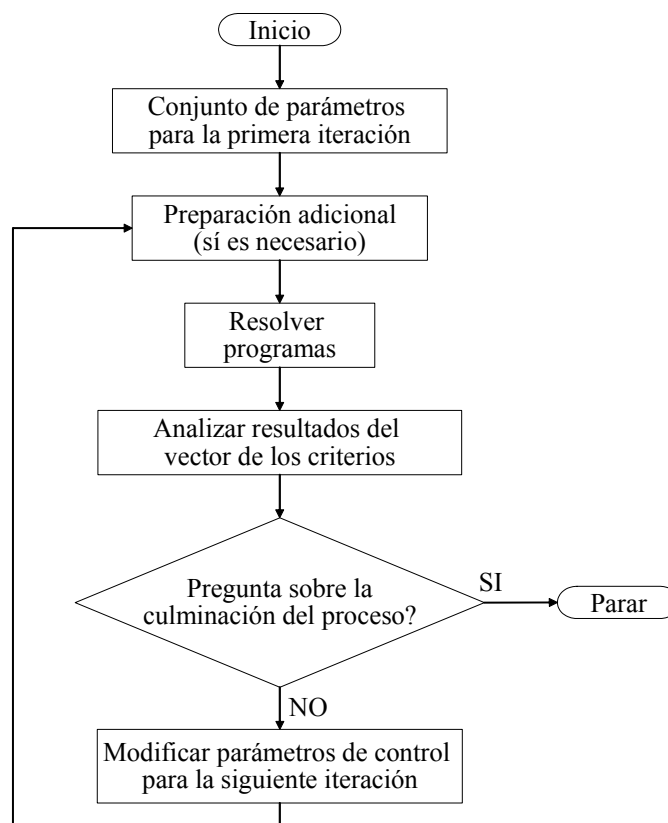


Figura 6.18
Perfil del algoritmo general

Fuente: Steuer (2000).

6.5 Selección del método de solución multiobjetivo

La elección de un método de solución apropiado para el problema de optimización multiobjetivo propuesto, no es un asunto fácil como se podría asumir. De acuerdo con Miettinen (1999), ninguno de los métodos existentes puede ser etiquetado como el mejor para cualquier situación, debido a que existen muchos aspectos a considerar y demasiados criterios de comparación un tanto de carácter difuso.

En términos generales, Hobbs (1986) señala que las características del problema a resolver y la capacidad del tomador de decisiones han sido los elementos que muchas veces han influido en la elección de un método de solución. Algunos métodos pueden convenir a algún problema y algunos centros de decisión pueden ser mejor que otros.

Por lo anterior, dicho autor señala que los criterios para seleccionar un método deben ser: apropiados, de fácil uso, válidos y sensibles a los resultados. Por apropiado se debe entender que el método es adecuado al problema que se pretende resolver, es decir, que se ajuste a las personas quiénes lo van a usar y las instituciones en la cuales

va ha ser instrumentado. Fácil de usar, está relacionado con el esfuerzo y conocimientos necesarios con los que cuenta el analista y el tomador de decisiones. Por validación se refiere a que el método pueda evaluar los supuestos, es decir, que sean consistentes con la realidad. Finalmente, por sensibilidad, se entiende que los resultados del método seleccionado no se obtengan diferencias significativas con relación a otros métodos. Por su parte, Steward (1992), establece que la selección del método debe considerar los siguientes tres aspectos: *i)* la información del tomador de decisiones debe ser manejable y clara; *ii)* el método debe ser lo más transparente que sea posible; y *iii)* debe ser simple y eficiente.

La intervención del TD en los métodos de solución es un aspecto muy importante. Miettinen (1999) reporta que muchos experimentos han demostrado que el tomador de decisiones prefiere métodos simples debido a que pueden entenderlos mejor y sienten mayor control. Una cuestión importante a tener en cuenta, es el hecho de que en la fase de preguntas muchos TD se sienten incómodos por la desconfianza en proporcionar información confidencial que algunos métodos que así lo demandan, en tal virtud es claro intuir que esto puede afectar al procedimiento y por supuesto a los resultados.

6.5.1 Criterios de selección

Algunos otros criterios que influyen en el TD la selección el método de solución, son por ejemplo,

- a) La simplicidad de los conceptos utilizados. Algunos métodos son muy técnicos y los TD no tienen los argumentos científicos para entenderlos.
- b) Posibilidades de interacción. Algunos métodos no presentan forma de que el TD se involucre más en el proceso. Por fortuna los métodos interactivos se han diseñado para tal evento.
- c) Fácil interpretación de los resultados. La instrumentación del sistema en las instancias de uso, generalmente exigen que los resultados puedan ser de fácil acceso desde el punto de vista de su interpretación y manejo estadístico.
- d) Oportunidad de cambio. Se busca que los métodos permitan simular cambios en las preferencias de los TD para llevar a cabo análisis de sensibilidad y evaluación de sus acciones.

El método también debe ajustarse a la manera de pensar del TD. El lenguaje de comunicación entre el método y el TD debe ser claro para éste último. La posibilidad de que el TD pueda ver el efecto de sus preferencias en los resultados es una cuestión de vital importancia, esto permite lograr cierta confianza y una mejor interacción con el método.

Uno de los aspectos más importante en la selección del método esta relacionado con el hecho de qué tan bien el TD conoce el problema que desea resolver. Si no conoce bien sus limitaciones, potencialidades y posibilidades, necesitará de un método que lo ponga al tanto del problema. En caso opuesto, un método que haga posible enfocar directamente el interés del TD, es más recomendable.

6.5.2 Elección del método

Teniendo en cuenta los criterios de selección antes mencionados y la complejidad de los modelos propuestos, ya señalada en el capítulo anterior, y con la ayuda de los procedimientos de selección de Sen y Yang (1998) y Miettinen (1999), se logró conformar la metodología para resolver el problema planteado en esta tesis. Por lo tanto, a partir de las características de los métodos estudiados (congregados en la figura 6.19), se optó por utilizar el método de los “Pesos ponderados” y el método de “Dirección de referencia” de Vassilev y Narula (1993), los cuales corresponden con las características de los modelos multiobjetivo propuestos en esta tesis. La idea de utilizar ambas técnicas, apunta hacia la lógica de generar soluciones iniciales que permita ver el horizonte de la región de factibilidad, y con ello, plantear interactivamente nuevas alternativas de solución.

Específicamente, el método de Sen y Yang (1998), parte de agrupar los diferentes métodos de solución multiobjetivo por el momento en que el TD proporciona información, a partir de la cual, conduce ha que se establezca la regla de decisión más favorable para atender el problema. Por su parte, Miettinen (1999) conduce la elección considerando las características de las funciones objetivo y sus restricciones. Combinados ambos métodos en la figura 6.19 (bajo el esquema de Sen y Yang, 1998), la determinación de la metodología fue posible. Particularmente, en la literatura científica no existe un procedimiento práctico que ayude a definir el “mejor”, por tanto, la comparación de las características (modelo-técnica) parece ser un esquema valido.

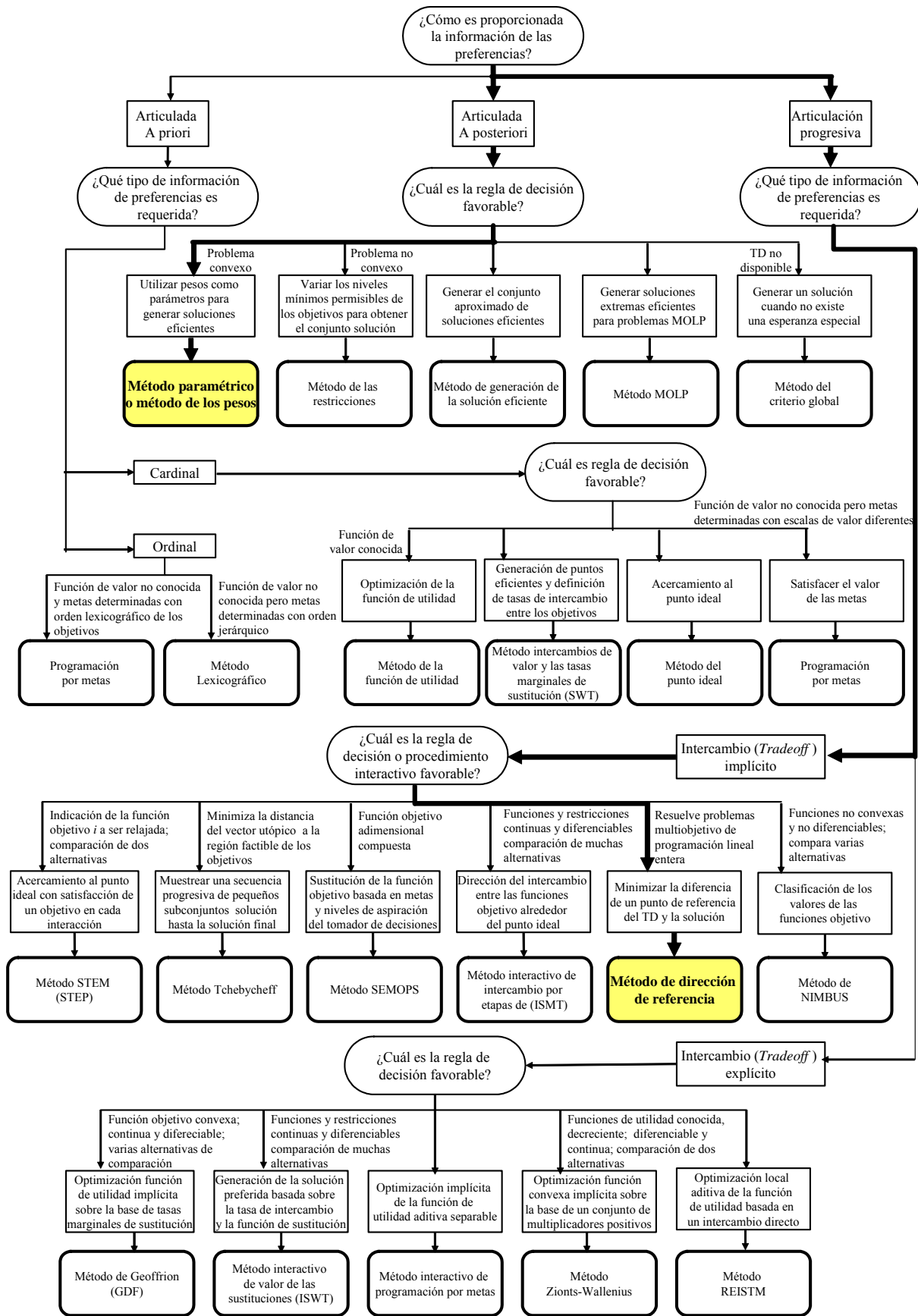


Figura 6.19

Árbol de decisión para seleccionar la técnica de solución de problemas multiobjetivo

Fuente: Adaptado de Sen y Yang (1998) y complementando con Miettinen (1999).

6.6 Metodología para la solución de los modelos propuestos

Para obtener la frontera eficiente de los modelos propuestos, para el caso de los *Incoterms* ExW y DDP, se adoptó un formulismo que combina los métodos interactivos de los “Pesos ponderados” y el de “Dirección de referencia” de Vassilev y Narula (1993). Con el primer método, el operador del modelo identifica la configuración de la frontera eficiente, determinando un conjunto de soluciones no dominadas que contiene el punto de referencia del segundo método, y por supuesto del tomador de decisiones.

El método de los pesos ponderados permite definir las cotas inferior y superior de cada uno de los escenarios analizados, y cierto número de soluciones no dominadas para cada tipo de *Incoterm*. A partir de esta primera aproximación, el segundo procedimiento es utilizado cuando ninguna de las soluciones generadas satisface las necesidades del tomador de decisiones, quién participa de manera interactiva en la generación de la solución que más se acerque a sus prerreferencias. Cabe señalar que el método de solución de los pesos ponderados tiene la desventaja de repetir soluciones ya encontradas para diferentes prestaciones de pesos, lo que hace complicado encontrar un mayor número o acercarse al total de soluciones en la frontera Pareto. Esta es la razón principal por la que se complementa con el método interactivo ya señalado.

La metodología de solución de los modelos propuestos, por lo tanto, se resuelve con el procedimiento general que se presenta en la figura 6.20. En dicha figura, aparecen dos columnas de inicio, las cuales cada una describe el proceso de ejecución de las actividades para cada modelo (ExW y DDP). Una vez obtenidas las soluciones no dominadas con el método de los pesos ponderados, el TD efectúa un análisis de dichas soluciones sobre la base de las cotas inferior y superior, para definir el tipo de término de negociación que más se acerque sus aspiraciones. Si le satisface alguna solución, selecciona ésta y el proceso termina. En caso que no le resulte satisfactoria alguna solución, indicará un nivel de aspiración, y de acuerdo a las magnitudes establecidas (en coste y nivel de servicio de transporte), se selecciona el tipo de *Incoterm*. A partir de este momento, el proceso entra en un ciclo con el método de la Dirección de referencia (Vassilev y Narula, 1993), hasta que el TD esté satisfecho con alguna solución que el método genere.

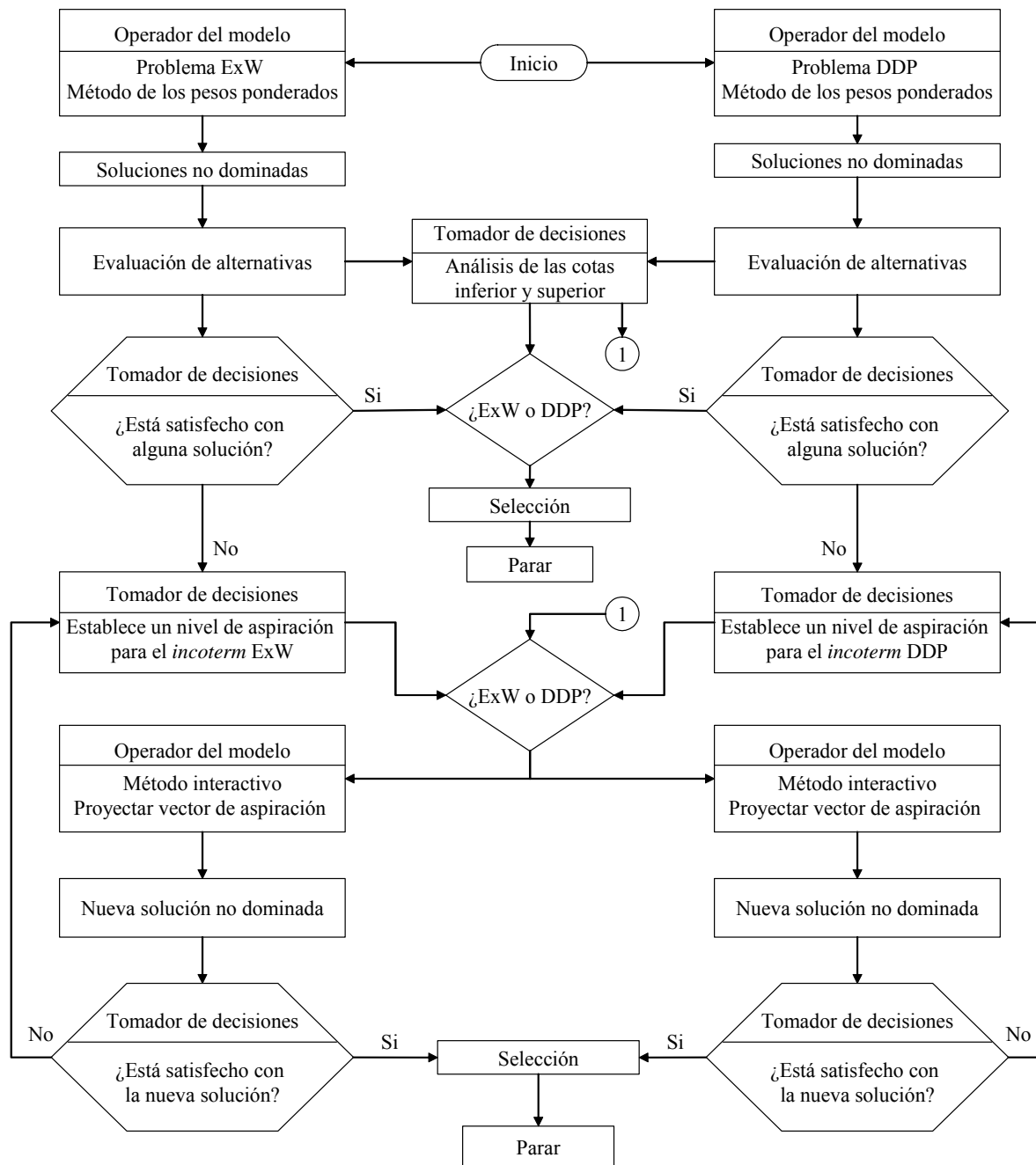


Figura 6.20
Metodología para la solución de los modelos propuestos

6.7 Conclusiones

Los métodos para resolver problemas multiobjetivo son una herramienta fundamental que permiten visualizar los resultados de los programas matemáticos de este tipo. En general, en los últimos años se ha observado grandes avances en el desarrollo de esta clase de métodos. Como se pudo corroborar, las primeras

aplicaciones presentaban algoritmos muy complejos con una gran cantidad de supuestos bastante duros que se deben cumplir para hacerlos operativos.

En la actualidad, basados en la teoría de los viejos esquemas de solución, los métodos más recientes son formulados con un perfil mucho más homogéneo, y sobre todo más fáciles de comprender y aplicar. La versatilidad que muestran los últimos métodos, permite al TD y al operador de los modelos, lograr resultados en el menor tiempo con el uso de software computacional de tipo comercial. Este último hecho representa un elemento esencial en la utilización y proliferación de estas técnicas en los diferentes sectores industriales.

No obstante, a pesar de todos los adelantos mencionados, la búsqueda de un método que resolviera los modelos propuestos en esta tesis, no fue una tarea fácil. El estudio de los diversos métodos publicados en la literatura científica se complica por la gran cantidad que de ellos existe; pero sobre todo, por las muy variadas características específicas que cada uno posee. Sin embargo, con la ayuda de dos metodologías para la selección del método de solución se pudo cumplir con el objetivo de este capítulo. De esta manera, teniendo en cuenta las características de los modelos propuestos, y ciertas condiciones operativas de los métodos analizados, han llevado al descarte o aceptación de éstos.

En general, cabe mencionar que los métodos “*a priori*” y “*posteriori*”, puede concluirse que contrastan notablemente respecto a los modelos interactivos, en términos de la solvencia que presentan en la generación de soluciones; en éstos, el TD, al disponer de la información necesaria e interactuar con el analista, parece mejorar notablemente su capacidad de elección entre distintas alternativas.

En este sentido, a raíz del estudio de los diversos métodos multiobjetivos, se ha podido plantear el esquema o metodología a utilizar en la aplicación de los modelos propuestos. De esta manera, surge la idea de combinar dos métodos de solución (uno del tipo de información “*a posteriori*” y otro “*interactivo*”), los cuales han permitido diseñar un método versátil y robusto para obtener las soluciones al problema propuesto, que además, con el carácter interactivo que posee, posibilita que esté presente el criterio de los usuarios del sistema.

Referencias

1. (Bandte, 2000) Bandte, Oliver (2000). "A Probabilistic Multi-Criteria Decision Making Technique for Conceptual and Preliminary Aerospace Systems Design". Doctor of Philosophy in Aerospace Engineering Georgia Institute of Technology September, 2000.
2. (Benayoun, *et al*, 1971) Benayoun, R. de Montgolfier, J; Tergny, J; y Larichev, O.I. (1971). "Linear Programming with Multiple Objective Functions: STEP Method (STEM)". *Mathematical Programming*; vol. 1, num. 3, pp. 366-375.
3. (Caballero, *et al*, 2003) Caballero F. R, Hernández H. M y Luque, G M. (2003). "Métodos interactivos en programación fraccional". Departamento de Economía Aplicada (Matemáticas). Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales. Universidad de Málaga, España.
4. (Chankong y Haimes, 1978) Chankong y Haimes (1978). "The Interactive Surrogate Worth Tradeoff (ISWT), Method Multiobjetive Decisión Making". En Zionts (ed.) "Multiple Problem Solving, Lecture Notes en Economics and Mathematical Systems; vol. 155, pp. 42-67.
5. (Chankong y Haimes, 1983). Chankong y Haimes (1983). "Multiobjetive Decision Making: Theory and Methodology". North-Holand, New York.
6. (Charnes y Cooper, 1961) Charnes, A., y Cooper, W. W. (1961). "Management Models and Industrial Applications of Linear Programming". New York: John Wiley and Sons.
7. (Deb, 2001) Deb, Kalyanmoy (2001) "Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms". John Wiley & Sons (ASIA); Pages 515; ISBN: 9814-12-685-3.
8. (Ehrgott, 2002) Ehrgott, Matthias (2002). "Multiple Criteria Optimization: State of the Art Annotated Bibliographic Surveys". Secaucus, NJ, USA: Kluwer Academic Publishers.
9. (Geoffrion, *et al*, 1972) Geoffrion, A, Dyer, J, y Feinberg A. (1972). "An Interactive Approach for Multicriterion Optimisation with an Application to the Operation of an Academic Department". *Manage. Sciences*; vol. 19, num. 4, pp. 357-368.
10. (Ghiassi, *et al*, 1984) Ghiassi, M. DeVor, R.E, Dessouky, M. I, y Kijowski, B. A. (1984). "An application of multiple criteria decision making principles for planning machining operations". *IIE Transactions*; vol. 16, num. 2, pp. 106-114.
11. (Haimes y Hall, 1974) Haimes, Yacov Y., y Hall, Warren A. (1974). "Multiobjectives in Water Resources Systems Analysis: the Surrogate Worth Trade-off Method". *Water Resources Research*; vol. 10, num. 4, August, pp. 615-624.
12. (Hobbs, 1986) Hobbs B. F. (1986). "What Can We Learn From Ex-Periments in Multiobjective Decision Analysis?". *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics SMC*; vol. 16, pp. 384-394.
13. (Korhonen, 1998) Korhonen, Pekka (1998). "Multiple Objective Programming Support". International Institute for Applied Systems Analysis; INTERIM REPORT IR-98-010 /March, Austria.
14. (Korhonen, y Halme, 1996) Korhonen, P. y Halme, M. (1996). "Using Lexicographic Parametric Programming for Searching a Nondominated Set in Multiple Objective Linear Programming". *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*; vol. 5, num. 4, pp. 291-300.
15. (Maragos y Despotis, 2003) Maragos, Elias K. y Despotis, Dimitris K. (2003) "Comparing Multiobjective Mathematical Programming Methods in the Light of Data Envelopment Analysis". Department of Informatics, University of Piraeus, Greece.

16. (Marglin, 1967) Marglin, S. A. (1967). "Public Investment Criteria". MIT Press, Cambridge, MA.
17. (Miettinen y Mäkelä, 1999) Miettinen, K y Mäkelä, MM. (1999). "Comparative Evaluations of Some Interactive Reference Point Based Methods for Multi-objective Optimization". *Journal of the Operational Research Society*; vol. 50. pp 949-959.
18. (Miettinen, 1999) Miettinen, Kaisa (1999) "Nonlinear Multiobjective Optimization ".Kluwer Academic Publishers, Boston.
19. (Monarchi, *et al*, 1973) Monarchi D, Kisiel C, y Duckstein L. (1973). "Interactive Multiobjective Programming in Water Resources: A Case Study", *Water Resources Research*; vol. 9, num. 4, pp. 837-850.
20. (Polak y Payne, 1976) Polak y Payne (1976). E. Polak and A. N. Payne, "On Multicriteria Optimization". Published as: *Directions in Large Scale Systems*, Y. C. Ho and K. S. Mitter (eds.) Plenum Press, N.Y, pp. 77-94.
21. (Sen y Yang, 1998) Sen, P. y J. B. Yang, 1998. *Multiple Criteria Decision Support in Engineering Design*. Springer, London, New-York.
22. (Steuer y Choo, 1983) Steuer, R. E. y Choo, E. U. (1983). "An Interactive Weighted Tchebycheff Procedure for Multiple Objective Programming". *Mathematical Programming*; vol. 26, num. 1, pp. 326-344.
23. (Steuer, 1986) Steuer, Ralph E. (1986) "Multiple Criteria Optimization: Theory, Computation and Application". John Wiley & Sons, Inc.
24. (Steuer, 2000) Steuer, E. R (2000). "Multiobjective Programming". *Encyclopedia of Operations Research and Management Science*; Gass, Saul y Harris, Carl. (Eds.). Kluwer Academic Publishers.
25. (Stewart, 1992) Stewart, T.J. (1992). "A Critical Survey on the Status of Multiple Criteria Decision Making Theory and Practice". *OMEGA*, 20 (5/6), pp. 569-586.
26. (Vassilev y Narula, 1993) Vassilev, Vassil y Narula, Subhash (1993). "A Reference Direction Algorithm for Solving Multiple Objective Integer Linear Programming Problems". *The Journal of the Operational Research Society*; vol. 44, num. 12, pp. 1201-1209.
27. (Wierzbicki, 1980) Wierzbicki, A. (1980), "The Use of Reference Objectives in Multiobjective Optimization", in G. Fandel y T. Gal (Eds.), "Multiple Objective Decision Making, Theory and Application". Springer-Verlag, New York.
28. (Zadeh, 1963) Zadeh, L (1963). "Optimality and Non-Scalar-Valued Performance Criteria". *IEEE Trans Autom Control*; vol. 8, pp. 59-60.
29. (Zionts y Wallenius, 1976) Zionts, S y Wallenius, J (1976). "An Interactive Programmig Method for Solving the Multiple Criteria Problem". *Management Science*; vol. 22, num. 6, pp. 652-663.
30. (Zeleny, 1973) Zeleny, M. (1973) "Compromise Programming". En J. L. Cochrane, M. Zeleny (Eds.): "Multiple Criteria Decision Making"; University of South Carolina Press, Columbia, pp 262-301.

Capítulo 7

Aplicación de los modelos propuestos a una empresa del sector de las autopartes: Análisis numérico

7.1 Introducción

En este capítulo se presenta el análisis de los resultados obtenidos a partir de la aplicación de los modelos propuestos en el capítulo 5, haciendo uso de la metodología diseñada en el capítulo 6 y tomando como referencia los datos de una empresa de autopartes del sector de la automoción. El objetivo principal de este capítulo es evaluar los beneficios económicos y del servicio de transporte combinado, que obtienen el cliente y el proveedor cuando asumen la estrategia de coordinación ECR, respecto a la política no coordinada, donde el cliente lanza sus ordenes bajo su política óptima. El análisis numérico se realiza en función de los ahorros obtenidos en coste y mejora del nivel de servicio del transporte por parte de ambos agentes y del sistema (cliente-proveedor), al usar dicha estrategia en el contexto ExW y DDP.

Para realizar el estudio comparativo de ambos enfoques, fueron diseñados siete escenarios que describen las diferentes posiciones que pueden asumir el cliente y el proveedor. Dichos modelos se aplicaron para el caso de una empresa del sector automoción que produce componentes o autopartes que abastece a un proveedor del primer anillo.

Los resultados obtenidos de los modelos para cada caso de los *Incoterms* ExW y DDP, se adoptó un método que combina los procedimientos interactivos de los “pesos ponderados” y el de “dirección de referencia” de Vassil Vassilev y Subhash Narula (1993). Como ya se mencionó en el capítulo anterior, el primer procedimiento consistió en que el operador del modelo establece la configuración de la frontera eficiente a partir del método de los pesos ponderados, identificando un conjunto de soluciones no dominadas que forman el punto de referencia del segundo procedimiento, y por supuesto del tomador de decisiones. A partir de esta primera aproximación, el segundo método es utilizado cuando ninguna de las soluciones generadas satisface las

necesidades del tomador de decisiones, haciendo participar a éste último de manera interactiva para generar la solución que más se acerca a sus prerreferencias.

Por lo anterior, este capítulo está estructurado de la siguiente manera: primeramente se establece el marco empírico que describe de manera general las características de la empresa que se tomó de referencia, y de la cual se obtuvieron los parámetros requeridos por los modelos. Inmediatamente después, se presenta una descripción del diseño de los experimentos (escenarios) que se utilizaron para hacer la evaluación de las alternativas de solución encontradas con los modelos, para cada uno de los diferentes tipos de negociación del comercio exterior (ExW y DDP). Posteriormente, se muestran los resultados obtenidos con el método de Vassilev y Narula (1993), para cuando ninguna alternativa generada con el método de los pesos es satisfactoria para el tomador de decisiones. Al final se presentan las conclusiones derivadas de este análisis.

7.2 Marco empírico

En esta sección se reúnen los datos empíricos obtenidos de una empresa de autopartes localizada en México, los cuales se tomaron de referencia para alimentar los modelos propuestos. De esta manera, en términos generales el marco empírico describe las características de la empresa de referencia, a la que le conocerá en esta tesis como Manufactura de Autopartes, S.A. De esta compañía, se describen algunos de los productos que fabrican, las características de los flujos de abastecimiento a sus clientes; se presenta algunas estimaciones de sus costes logísticos y del comportamiento de su demanda. Implícito, se explica la relación actual con un cliente específico, localizado en Alemania, al que se le denominará CIALESA. A petición de de ambas compañías, se omite su nombre verdadero, para mantener la confidencialidad de la información proporcionada.

7.2.1 La empresa proveedora

Manufactura de Autopartes, S.A. (MASA), es una sociedad anónima con 55% propiedad de un grupo alemán y 45% de capital mexicano dedicada a la fabricación de autopartes. En términos generales, suministra autopartes a los proveedores de primer anillo del sector del automóvil y al sector de repuestos; es decir, es una empresa que

pertenece al segundo nivel en la cadena de suministro de la industria de la automoción, de acuerdo con la clasificación hecha por Lamming (1993) y Brunnermeier y Martin (1999). Esta empresa fue promovida por el interés de un concesionario mexicano de origen alemán que participa como socio minoritario, cuya estrategia corporativa buscó penetrar tanto el mercado mexicano como los mercados norteamericano, asiático y latinoamericano, además del mercado Alemán.

Esta empresa fue fundada en 1975 y está conformada por tres plantas localizadas en diferentes sitios de la Republica Mexicana: Tlalnepantla (Estado de México), Puebla (Estado de Puebla) y Pachuca (Estado de Hidalgo), de donde abastecen al mercado interno e internacional. Emplea alrededor de 296 trabajadores directos, y es apoyada por 27 compañías, entre fabricantes y distribuidores, nacionales y extranjeros. El mercado internacional lo abastece con el 75% de su producción; la otra parte es destinada al mercado doméstico. Los mercados internacionales más importantes de esta empresa son los Estados Unidos con el 72% de sus exportaciones y Alemania con alrededor del 24%. El resto es enviado a Brasil y Japón (2.7% y 1.3%, respectivamente).

Una de sus principales políticas está orientada en conseguir un mayor número de clientes en el continente Europeo, y por ello participa activamente en ferias, congresos y reuniones en dicha región.

La organización de la empresa está compuesta por tres áreas fundamentales: Dirección Comercial, Dirección de Administración y Finanzas, Dirección de Producción, todas ellas dirigidas por un Presidente y el Consejo de Accionistas, que administran las tres plantas antes citadas. El estado financiero, como muchas compañías en México presenta importantes desplomes en sus ventas, derivado de la crisis económica y múltiples problemas operativos, entre los que destacan el suministro de sus productos a los clientes en el comercio internacional.

Por lo anterior, desde el año 2001, con la finalidad de consolidar su negocio en el extranjero, MASA formalizó una alianza estratégica con un operador logístico, convirtiéndose en el socio principal con una participación del 70% del capital social, al que se le denominará en esta tesis Operador Logístico, S.A. (OLSA). Este operador cuenta con diversos almacenes (propios y arrendados) en puertos marítimos y un almacén central de consolidación de cargas ubicado en la región centro del país

(Tlalnepantla); cuenta con una flota vehicular propia compuesta por 65 camiones de carga tipo trailer y 95 cajas o contenedores para el movimiento de mercancías.

7.2.1.1 Los productos

Manufactura de Autopartes, S.A., es una empresa que ofrece componentes para diversos sectores, tales como el agrícola (8%), industrial (10%) y automotriz (82%). En el sector automotriz fabrica mazas, suspensiones, partes para motor, y una gran variedad de bujes, brindando otros servicios de suministros complementarios y soporte técnico especializado en este campo. Las principales marcas automotrices que abastece son: Ford, Nissan, Honda, Chevrolet, Dodge y Volkswagen. Para este Sector, produce alrededor de 240 productos diferentes con un volumen de aproximadamente de 38 millones de componentes anuales. La descripción genérica de los principales productos que fabrica se presenta a continuación.

7.2.1.2 Autopartes para la suspensión: rótulas y estabilizadores

La suspensión del automóvil está formada por las ballestas, horquillas rótulas, muelles, y amortiguadores, estabilizadores, ruedas y neumáticos. El bastidor del automóvil puede ser considerado como el cuerpo integrador de la suspensión. Está fijado a los brazos de los ejes mediante ballestas o amortiguadores. En los automóviles modernos, las ruedas delanteras (y muchas veces las traseras) están dotadas de suspensión independiente, con lo que cada rueda puede cambiar de plano sin afectar directamente a la otra. Los estabilizadores son unas barras de acero elástico unidas a los amortiguadores para disminuir el balanceo de la carrocería y mejorar la estabilidad del vehículo.

De la suspensión depende la estabilidad, el agarre y la maniobrabilidad de los vehículos, como también su mejor disposición para enfrentar situaciones diferentes. Las suspensiones deben ser juzgadas por sus características constructivas, más que por la cantidad de elementos que la componen. Fundamental en ellas es la regulación de sus diversas piezas, los anillos de goma, los neumáticos, la calibración de los resortes y amortiguadores. También, las regulaciones milimétricas de la convergencia, desplazamiento, incidencia e inclinación.

7.2.1.3 Autopartes para la suspensión: mazas

Las mazas son un componente muy importante para la suspensión y tracción de vehículos, especialmente de la rueda, porque contribuye con:

- a. El desplazamiento del vehículo, mediante la tracción transmitida por la caja de velocidades hasta la rueda a través de la junta homocinética de precisión.
- b. El frenado del automóvil con acción contraria de desplazamiento.
- c. La reducción de la fricción entre la espiga y la rueda mediante un rodamiento que se inserta en el cuerpo de la maza.

7.2.2 Servicios Logísticos proporcionados por el Operador Logístico, SA (OLSA)

Operador Logístico, SA (OLSA), se alió con MASA en el 2001 y opera como una empresa independiente que proporciona servicio de almacenamiento y transporte para MASA y clientes externos. Dicho sistema de operación, prácticamente es del tipo de alianzas estratégicas que ha explorado Lambert y Gardner (1996), la cual busca explotar las ventajas y oportunidades que proporciona este tipo de acuerdos (Rey, 2001).

OLSA ofrece diferentes servicios para sus clientes, tales como gestión logística de aprovisionamiento (*inbound*) y entrega (*outbound*), gestión de inventarios, transporte, servicios de valor agregado, empaque, embalaje, control de ordenes y adquisiciones, administración de las exportaciones y documentación. Esta empresa busca ofrecer servicios de excelencia con el propósito de satisfacer los requerimientos de los clientes.

De manera particular, gestiona el movimiento de los productos de MASA utilizando la red mundial de transporte, la cual involucra todos los modos. Para los Estados Unidos, OLSA cuenta con diferentes servicios unimodales y multimodales de transporte (autotransporte, ferrocarril, marítimo y aéreo); para los otros mercados, está obligado a utilizar el servicio multimodal de transporte (cadenas de transporte): ambos caso con diversas rutas alternas. Para lograr lo anterior, utiliza un sistema para la administración del transporte de los conocidos como TMS (*Transportation Management System*), que le ayuda a gestionar el programa de entregas a los clientes

nacionales e internacionales. Este sistema posee una componente especial para ofrecer al cliente el seguimiento de la carga en tiempo real.

Cómo política, la empresa busca entregar el producto a su cliente en el tiempo convenido, es decir, con un nivel de servicio al 100%; sin embargo, reconocen que en ocasiones esto no se cumple. OLSA conoce los tiempos de entrega entre los almacenes de la empresa y sus clientes; además conoce que existen alrededor de 23 rutas internacionales posibles de uso.

Debido a que cuenta con una flota vehicular de 65 camiones, el sistema es bastante flexible porque les permite reprogramar ciertos camiones si se presenta un cambio súbito en la demanda. Al año, el sistema maneja aproximadamente alrededor 9,500 contenedores.

Por lo que respecta al coste de transporte, ambas empresas negocian los servicios para cada ruta, teniendo en cuenta si los contenedores son cargados completamente en un sitio “*contenedor completo*” (FCL) o que sean embarques por “*contenedor consolidado*” (LCL).

En resumen, OLSA ofrece servicios de logística de distribución y abasto y de atención al cliente; cuenta con un moderno y dinámico sistema para la gestión logística de la distribución y de servicio al cliente que le permite programar las entregas normales después de haberse ingresado el pedido. La empresa ha puesto en marcha un centro de atención exclusivo para clientes operado por *Internet*, en donde se recibe todo tipo de consultas sobre la evolución de entrega de sus pedidos, así como su estado de cuenta corriente. Esto se debe a que OLSA, como política, establece el uso las tecnologías avanzadas para proporcionar un mejor servicio al cliente, tal y como es reconocido en Jiménez y Hernández (2002). El uso de *Internet* le ha permitido mantener una comunicación directa con el cliente para recibir sus pedidos y ofrecer promociones.

7.2.2.1 Características de los flujos de abasto

Por lo que respecta a los clientes de MASA, se sabe que existen ocho compradores principales entre proveedores de primer nivel y empresas comercializadoras (distribuidores). Sin embargo, MASA destaca que estos clientes le representan el 82% de sus ventas, localizadas en los Estados Unidos, México y

Alemania. En este contexto, los flujos de abasto entre la empresa MASA y sus clientes presentan las siguientes características.

7.2.2.2 El proceso de adquisición del cliente (proveedor de primer nivel)

MASA, señala que el proceso de venta de su productos normalmente se lleva a través de dos Departamentos de sus clientes. Con el área de compras y con la parte operativa que administra la cadena de suministro. Añade que dichos Departamentos se dividen la responsabilidad. Compras es responsable de buscar a los proveedores y contactarse para formular los contratos comerciales. El Departamento de gestión de la cadena de suministro es el responsable de todas las operaciones que incluyen los contratos, en este sentido, dicho Departamento tiene comunicación constante con MASA, y en particular con OLSA, para atender todo lo relacionado con el envío de los productos, tales como, transporte y frecuencia, así como el seguimiento de la carga y su desempeño.

MASA señaló que algunos clientes establecen ciertas políticas que ellos como proveedores deben observar en sus procesos. Estas políticas involucran, entre otras cosas, atender pedidos con tiempo de entrega cortos, mejora continua del desempeño del proveedor en sus envíos, aumentar la frecuencia de envíos, y que el enfoque de su operación debe ser sobre los costes logísticos totales, y no sólo optimizar los costes de transporte, tal y como lo señala Langley (1999).

7.2.2.3 Flujos de abasto en el mercado internacional y doméstico

En términos generales, los flujos de abasto pueden ser caracterizados por el suministro de productos que fluyen desde sus plantas hasta el sitio que designe el cliente (proveedores de primer nivel), nacional o extranjero.

Por la distancia que existe entre MASA y sus clientes en los mercados internacionales, esta empresa utiliza un sistema de inventarios basado en un política de revisión periódica, que está en función del ritmo y las cantidades solicitadas por sus clientes (véase Silver, *et al*, 1998). De esta manera, MASA planifica sus envíos teniendo en cuenta solamente el tiempo de embarque y de transporte, ya que mantiene un nivel de inventario para atender su demanda.

Para el mercado en Estados Unidos, MASA responde adecuadamente en un esquema muy similar al *justo a tiempo*, toda vez que dispone de los modos de transporte con operación adecuada y el tiempo de transporte relativamente corto (máximo 36 horas). Sin embargo, para el caso de los mercados en Alemania, Japón y Brasil, reportan que los clientes normalmente han decidido utilizar un almacén de consolidación en sitios estratégicos (cercano a su planta) para aprovisionarse en una estrategia del tipo *justo a tiempo* (véase Fernández, *et al*, 2006). El esquema operativo genérico descrito para el caso de los mercados en Europa, Asia y Sudamérica se ilustran en la figura 7.1

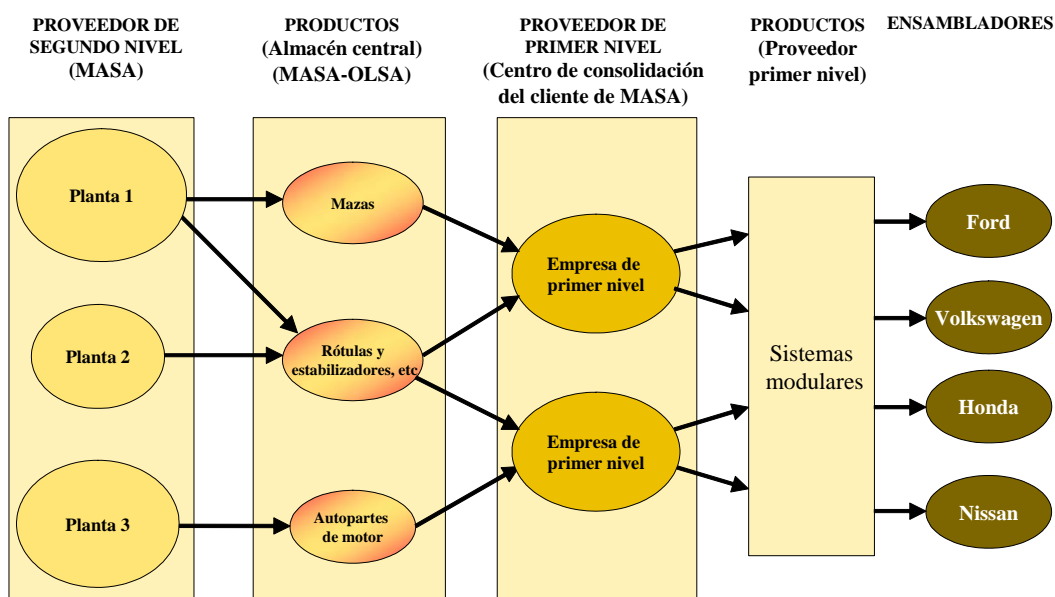


Figura 7.1
Flujos típicos del suministro internacional de autopartes en el sector del automóvil de la empresa bajo estudio

Fuente: elaboración propia con base en la información proporcionada por la empresa.

En el mercado doméstico formulan acuerdos comerciales con sus clientes del tipo *justo a tiempo*, programando entregas frecuentes. En general, MASA no presenta problemas serios en este tipo de entregas ya que éstas se llevan a cabo de manera puntual utilizando únicamente camiones. Sin embargo, reportan que debido a las condiciones de tránsito vehicular en la región centro, estiman que sus costes se incrementan porque tienen que adelantar individualmente sus operaciones de entrega para evitar el congestionamiento vehicular, aumentando su tiempo de espera en el patio de su cliente, en otras palabras, incrementan su coste de inventario en tránsito.

7.2.2.4 Términos del comercio internacional (*Incoterms*)

Con relación a los términos de negociación del comercio internacional (*Incoterms*) empleados por MASA, señalaron que éstos se ponen a juicio del cliente. Por ejemplo, informaron que los clientes en los Estados Unidos solicitan una negociación del tipo FCA (*Free Carrier*) en frontera y FOB (*Free On Board*) en puerto y muy pocos DDP (*Delivered Duty Paid*), sobre todo los distribuidores; los clientes en Brasil, utilizan CIF (*Cost, Insurance and Freight*); por su parte, los clientes en Japón y en Alemania prefieren el *Incoterm* DDU (*Delivered Duty Unpaid*). Desafortunadamente, desconocen los criterios utilizados por sus clientes para definir esta decisión. Sin embargo, estimaron que, en algunos casos, se debe al tipo de legislación vigente.

7.2.3 Empresa cliente bajo estudio

A petición de la empresa, y por necesidades de mejorar su operación en el mercado internacional, concretamente en el continente Europeo, se seleccionó al cliente en Alemania (a quién se le conocerá en esta tesis como CIALESA). Con dicho cliente, MASA ha mantenido excelentes relaciones comerciales en un régimen de contratos anuales de aprovisionamiento. Esto ha permitido conseguir cierta información confidencial necesaria para este análisis.

7.2.3.1 Productos seleccionados y demanda anual

En concreto, CIALESA se dedica a la fabricación de sistema de suspensión modular, sistemas de ruedas y motores en Alemania; en otros países fabrican sistemas y módulos de techos, puertas, control de accesos y otros. Específicamente, esta empresa lanza pedidos cada 15 días (dos veces por mes) y se abastece de 12 productos de los 240 que fabrica su proveedor en México, con un volumen anual aproximadamente de 6'840,000 componentes; es decir, el 18% de la producción de MASA.

De los 12 diferentes tipos de productos que MASA suministra a CIALESA, cinco de ellos representan casi el 70% de sus envíos, es decir, 4'783,100 componentes anuales. Estos cinco productos, por tanto, han sido seleccionados para el presente análisis. En el cuadro 7.1 a continuación se muestra el volumen anual de cada producto y su precio unitario de venta. Nuevamente, con la intención de mantener la

confiabilidad de la empresa, no se presentan las características específicas de estos componentes automotrices.

Cuadro 7.1
Precio y demanda anual de los productos seleccionados para el estudio

Concepto	Producto 1 Rótulas	Producto 2 Volante de motor	Producto 3 Juego de Bujes	Producto 4 Mazas para rueda trasera	Producto 5 Mazas para rueda delantera	Total
Precio del producto (dólares)	\$317.18	\$299.78	\$26.02	\$140.53	\$138.41	--
Número de componentes por año	950,600	308,600	1,355,100	959,900	1,208,900	4'783,100
Participación con respecto al total producido	2.5%	0.8%	3.6%	2.5%	3.2%	12.6%

Fuente: elaboración propia con base en la información proporcionada por la empresa.

7.2.3.2 Costes por ordenar y de almacenamiento

Los costes por ordenar y de almacenamiento son dos de los costes más difíciles de cuantificar, y lo que es peor, normalmente las empresas los desconocen por completo. De acuerdo con la teoría de general de los inventarios (véase Garrett J. y van Ryzin, 2001), ambos conceptos generalmente son considerados para determinar la política de abasto y contribuyen de manera importante en los costes totales de gestión. Para este caso en particular, CIALESA informa que posee registros globales de estos dos conceptos debido a los múltiples clientes que tienen a nivel mundial y por la infinidad de operaciones que realizan conjuntamente.

Para el caso de los costes por ordenar, cuentan con esta información a nivel general; no obstante, a petición formulada por el proveedor (MASA), el cliente proporcionó una estimación del coste por producto sin presentar evidencia alguna de su cálculo. Por este motivo, para validar dicha información se llevó a cabo una investigación sobre la existencia de los estándares internacionales de la industria de la automoción, sin encontrar respuesta alguna.

Lo anterior se justifica por el hecho de que en cada empresa se controla un sinnúmero de factores que los hacen diferentes, sin embargo, la *Apparel Research Logistics* (2006)¹, en su página web, publica los estándares de las compañías manufactureras de la industrial textil que abastecen telas no sólo a la industria de la ropa, sino también a la industria del automóvil. En términos generales, esta compañía señala que para procesar una orden de compra normal, los costes se encuentran en un

¹ http://www.apparelsearch.com/logistics_benchmarks.htm.

rango de entre \$100 - \$160 dólares. De acuerdo a los datos proporcionados por la empresa en estudio, se observa que algunos de sus costes por ordenar caen dentro de este rango. En particular, el coste promedio por ordenar de \$87.00 dólares, es indicativo del uso de las tecnologías de comunicación más avanzadas para gestionar los pedidos (véase cuadro 7.2).

Cuadro 7.2
Coste por ordenar

	Producto 1	Producto 2	Producto 3	Producto 4	Producto 5	Promedio
Datos de la empresa	\$100.00	\$85.00	\$45.00	\$95.00	\$110.00	\$87.00

Fuente: elaboración propia con base en la información proporcionada por la empresa.

Por lo que respecta a los costes de almacenamiento, la empresa los calcula utilizando el método de la tasa anual “*ad-valorem*”.² Este método de aproximación, que se utiliza bastante para la planificación de sistemas logísticos, consiste en admitir que los costes de almacenamiento pueden ser aproximados por una tasa anual aplicada al valor de las mercancías almacenadas.

Esta hipótesis, que es evidente en el caso de los costes financieros de los inventarios, se generaliza en este método a los demás costes que intervienen en el almacenamiento (inversiones, personal, energía, deterioros, perdidas, etc.), asumiéndose que cuanto más cara es una mercancía más alto es el coste de almacenamiento.

Pues bien, el método de la tasa *ad-valorem* se extiende a los demás costes que componen el almacenamiento de los productos, admitiendo que además de la tasa anual correspondiente al coste de inventario, hay otros puntos porcentuales que corresponden a la integración de los demás costes que también intervienen en este proceso (por ejemplo, costes financieros, deterioro, obsolescencia), conformando tasas superiores a la del almacenamiento de productos.

Es muy importante destacar que estos costes, que se denominan "extras" en el almacenamiento, siempre están en relación directa con el tipo de mercancías que se trate, por lo tanto, no será lo mismo almacenar arena o leña, que componentes automotrices. Dell'Agnolo (2006), reporta que normalmente la estructura de costes más

² *Ad. Val. Ad-Valorem. Frase que significa "según el valor", que es usada de varias maneras, por ejemplo, cuando se hacen cotizaciones, tasas de seguro o tasas de flete. La expresión aparece también relacionada con los derechos de aduana, muchos de los cuales se calculan al valorar las mercancías. Aquí se utiliza como un cargo al coste por concepto de capital inmovilizado.*

empleada, considera: costes financieros de los inventarios, en un intervalo entre 8% y 20%; coste de almacenamiento físico en un rango del 5% al 15% y costes por deterioro o robo, del 2% al 5%.

Para calcular el coste unitario de almacenamiento, la empresa en estudio sugirió una tasa anual *ad-valorem* del 20% sobre el precio del producto en los 24 periodos de estudio, es decir:

$$h_i = P * \left(\frac{T_i}{24} \right) \quad (7.1)$$

h_i = Coste unitario de almacenamiento del producto i durante un período

P = Precio del producto

T_i = Tasa anual *ad-valorem* (20%)

Cabe señalar que los componentes automotrices no requieren de severos costes de manutención, aunque si de un esmerado sistema de almacenaje, por lo tanto, en este caso en particular, el coste de almacenamiento es valorado con una tasa que contempla sólo el coste financiero sin agregar algún cargo “extra”. El cuadro 7.3 muestra los costes de almacenamiento calculados para los productos seleccionados.

Cuadro 7.3
Coste unitario de almacenamiento por tipo de producto

Concepto	Producto 1	Producto 2	Producto 3	Producto 4	Producto 5
Coste unitario de almacenamiento por periodo (dólares)	\$2.6432	\$2.4981	\$0.2168	\$1.1711	\$1.4418

Fuente: elaboración propia con base en la información proporcionada por la empresa.

7.2.3.3 Costes y modos de transporte utilizados

El coste de transporte es una componente de las más importantes en el coste total en la gestión del aprovisionamiento. El conocimiento detallado de su magnitud permite estimar su influencia. No obstante, generalmente el cálculo de este coste es muy complejo debido a que está asociado al tipo de término de entrega convenido (*Incoterm*).

Hipotéticamente, el coste de transporte para el *Incoterms* DDP se podría considerar el de mayor “facilidad” de cálculo, teniendo en cuenta que el proceso es controlado por la empresa proveedora (MASA a través de OLSA); sin embargo, las dificultades de acceso a la información de las empresas navieras que intervienen en el proceso, no permiten especificar este dato con mayor precisión. Por este motivo, la empresa determina el coste promedio de transporte para cada modo a partir del coste logístico que asigna como porcentaje del precio de los productos, estimado para cada tipo de servicio (o modo) que utiliza.³

En este renglón, la empresa utiliza con mayor frecuencia la combinación camión-barco-camión (95% de las veces) para mover sus productos entre México y Alemania; en menor medida, y sólo para entregas urgentes, utilizan la combinación que incluye el avión (4.5%), y eventualmente, utilizan el ferrocarril (0.5%). Para el caso de la combinación con el transporte aéreo, lo hacen a través de convenios con empresas especializadas en envíos de paquetería y mensajería. El cuadro 7.4 presenta el coste promedio unitario de transporte y el porcentaje del coste logístico que es asignado entre México y Alemania.

Cuadro 7.4
Porcentaje del coste logístico de transporte y coste promedio de transporte por componente movilizado entre México y Alemania

Rutas alternativas de transporte	Porcentaje del coste logístico de transporte sobre el precio del producto	Coste promedio por componente transportado (dólares)	Modos de transporte (cadena de transporte)
Modo 1	2.3%	\$4.1541	Camión-avión-camión (modo rápido)
Modo 2	1.0%	\$1.8901	Camión- Barco-Camión (modo medio)
Modo 3	0.6%	\$1.0385	Camión-Ferrocarril-Barco-Camión-ferrocarril (modo lento)

Fuente: elaboración propia con base en la información proporcionada por la empresa.

A partir de esta información, es claro observar que utilizando modos de transporte más caros, como en el caso del transporte aéreo, el porcentaje del coste logístico sobre el precio de los productos será mayor. A partir del estudio realizado por García-Menéndez, *et al.* (2004), se estimó que el coste por unidad transportada por el modo

³ Para estimar sus costes logísticos OLSA se apoya en el informe generado por Establish, Inc, que administra un sistema de información de empresas del todo mundo, con el cual calculan los costes logísticos por sector industrial (ver www.establishinc.com)

aéreo es alrededor de 7 veces la del transporte marítimo; 3 veces la de ferrocarril y 2 veces superior al transporte carretero, según los volúmenes de carga transportada.

7.2.3.4 Distancia y tiempo de entrega

De acuerdo con el operador logístico, los productos que envían hasta Alemania viajan en promedio alrededor de 9,600 kilómetros de distancia. Señalan que el tiempo en tránsito dependerá de la cadena de transporte que se utilice. Por ejemplo, para este caso en particular, por el modo 1 entregan las mercancías en promedio de 3 a 4 días; para el modo 2, estimaron que arriban normalmente en alrededor de 9 a 11 días, mientras que en el modo 3, las mercancías llegan en 18 a 20 días. Esto equivale a decir que el modo rápido es aproximadamente superior en 2 y 3 veces el período de entrega que los modos medio y lento, respectivamente.

En el cuadro 7.5, se presenta el tiempo de tránsito de las mercancías por día; transformadas incluso en horas y en términos de la velocidad de servicio que son consideradas en el caso de estudio; cabe señalar que en esta tesis, la velocidad de servicio es considerada como el componente principal que permite evaluar el nivel de servicio del transporte desde un punto de vista de sistema.

Cuadro 7.5
Tiempo de viaje y velocidad de entrega como atributo principal del nivel de servicio del transporte

Concepto	Modo 1	Modo 2	Modo 3
Tiempo de tránsito (días)	3 a 4	9 a 11	18 a 20
Tiempo de tránsito (horas)	120.0	263.7	432.0
Velocidad de entrega (nivel de servicio de transporte)	80.0	36.4	22.2

Fuente: elaboración propia con base en la información proporcionada por la empresa.

7.2.3.5 Coste de inventario en tránsito

El inventario en tránsito genera un coste relativo al proceso de Distribución Física Internacional (DFI) que está en función del tiempo de tránsito de las mercancías. Específicamente, es el coste financiero incurrido sobre el valor total del envío que se calcula con base en el precio del producto en el lugar de embarque internacional en el país exportador, a la tasa de interés de la unidad monetaria utilizada por el país. Como

es considerado por Beresford (1999) en su modelo hipotético, el tiempo en tránsito incluye:

- Tiempo de tránsito transcurrido entre los lugares de embarque y desembarque internacional, y
- Lapsos de tiempo correspondientes a las interfases y a los puntos de ruptura o trasbordo de carga, entre los lugares de embarque y desembarque internacional.

La empresa estima su coste de inventario en tránsito de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$IT = P_i * \left(\frac{i}{365} \right) * T_T \quad (7.2)$$

IT = Inventario en tránsito

P_i = Precio del producto i

T_T = Tiempo en tránsito

i = Tasa de interés (12%)

De esta manera, los costes de inventario en tránsito por modo de transporte para cada producto seleccionado se muestran en el cuadro 7.6.

Cuadro 7.6
Coste unitario de inventario en tránsito para los productos seleccionados (en dólares)

Concepto	Producto 1	Producto 2	Producto 3	Producto 4	Producto 5
Precio del producto (\$ dólares)	\$317.18	\$299.78	\$26.02	\$140.53	\$138.41
Modo 1 (rápido)	\$0.5214	\$0.4928	\$0.0428	\$0.2310	\$0.2275
Modo 2 (medio)	\$1.0428	\$0.9856	\$0.0855	\$0.4620	\$0.4550
Modo 3 (lento)	\$1.8770	\$1.7740	\$0.1540	\$0.8316	\$0.8191

Nota: Tiempo en tránsito considerado: modo 1 = 5 días; modo 2= 11 días; modo 3= 18 días.

Fuente: elaboración propia con base en la información proporcionada por la empresa.

En este cuadro, es evidente que, independientemente del precio de los productos, el uso de los modos de transporte más rápidos (modo 1) se obtenga los menores costes de inventario en tránsito; contrario al caso de transportes más lentos, que producen el coste más alto.

7.2.4 Parámetros de los modelos

De acuerdo con el diseño del modelo, los parámetros se obtuvieron para cinco productos (autopartes) que se comercializan entre el cliente y el proveedor. En general, los datos sobre el precio, las cantidades de los productos y los costes por ordenar y abastecer (costes fijos), fueron proporcionados tanto por el cliente como por el proveedor, a partir de los cuales se dedujeron los parámetros del coste. Dicha deducción, se obtuvo a partir de un análisis de los costes logísticos para empresas del sector automotriz, aplicando los factores de uso de acuerdo con Davis (2005). De esta manera, en el cuadro 7.7 a continuación, se presentan todos aquellos parámetros que el modelo requiere para ser operativo.

Cuadro 7.7
Parámetros del modelo

Concepto		Producto 1	Producto 2	Producto 3	Producto 4	Producto 5
Precio del producto (dólares)	\$	317.18	299.78	26.02	140.53	138.41
Volumen de unidades por año	U	9384	3048	15840	9984	12624
Coste por ordenar (\$)	k_i	100.01	85.01	45.01	95.01	110.01
Coste por almacenar (\$)	h_i	2.6432	2.4981	0.2168	1.1711	1.4418
Coste de capital en tránsito del producto i por el modo 1 (\$)	H_{m1}	0.5214	0.4928	0.0428	0.2310	0.2275
Coste de capital en tránsito del producto i por el modo 2 (\$)	H_{m2}	1.0428	0.9856	0.0855	0.4620	0.4550
Coste de capital en tránsito del producto i por el modo 3 (\$)	H_{m3}	1.8770	1.7740	0.1540	0.8316	0.8191
Coste de transporte modo 1 (\$)	τ_1	4.1541	4.1541	4.1541	4.1541	4.1541
Coste de transporte modo 2 (\$)	τ_2	1.8901	1.8901	1.8901	1.8901	1.8901
Coste de transporte modo 3 (\$)	τ_3	1.0385	1.0385	1.0385	1.0385	1.0385
Eficiencia del transporte del modo 1	φ_1	80.00	80.00	80.00	80.00	80.00
Eficiencia del transporte del modo 2	φ_2	36.40	36.40	36.40	36.40	36.40
Eficiencia del transporte del modo 3	φ_3	22.22	22.22	22.22	22.22	22.22
Distancia de viaje de la carga	km	9,600				

Por lo que se refiere a los ahorros S_1 y S_2 ofrecidos al cliente sobre el coste total de los productos y del transporte de no usar la coordinación *ECR*, se ha propuesto para el modelado, el 10% y 15% respectivamente.

Los datos de la demanda por período y tipo de autopartes se obtuvieron de los registros anuales del cliente; es decir, a partir de un análisis de la producción mensual de automóviles, se determinó el índice de variabilidad de la demanda que fue utilizado para

definir el tamaño de la orden por período, con un factor aleatorio de media cero y desviación estándar 40. Dicha información se muestra en el cuadro 7.8 a continuación. Para ser utilizada en el modelo, se ha escalado (en miles de unidades) para lograr un mejor manejo de los resultados.

Cuadro 7.8
Demanda del cliente por tipo de componente o producto seleccionado (en miles)

Período	Producto 1	Producto 2	Producto 3	Producto 3	Producto 4	Total de unidades
1	425	183	691	493	737	2,529
2	500	179	732	453	598	2,462
3	495	108	824	507	699	2,633
4	413	80	854	352	677	2,376
5	531	122	725	352	536	2,266
6	383	71	791	370	477	2,092
7	562	158	807	534	595	2,656
8	438	77	729	469	611	2,324
9	576	145	838	498	671	2,728
10	565	197	817	509	672	2,760
11	328	203	650	395	275	1,851
12	288	177	190	267	398	1,320
13	289	129	175	225	321	1,139
14	296	85	200	209	438	1,228
15	202	112	232	183	321	1,050
16	176	56	187	150	271	840
17	277	100	123	163	448	1,111
18	212	125	110	235	165	847
19	392	125	223	350	395	1,485
20	426	183	593	490	504	2,196
21	425	73	560	575	562	2,195
22	488	121	753	590	607	2,559
23	324	67	850	620	461	2,322
24	495	210	897	610	650	2,862
Total de unidades	9,506	3,086	13,551	9,599	12,089	47,831

Las características de la información de la demanda, se presentan en el cuadro 7.9 a continuación.

Cuadro 7.9
Características de los datos de la demanda

Concepto	Producto 1	Producto 2	Producto 3	Producto 4	Producto 5
Desviación estándar	119.3	47.9	289.6	150.4	156.7
Variancia	14235.6	2296.5	83845.0	22619.3	24567.3
Media	396.1	128.6	564.6	400.0	503.7
Coficiente de variabilidad (var/med)	0.09074	0.13890	0.26300	0.14140	0.09683
Coficiente de variabilidad (SD/Media)	0.3012	0.3727	0.5128	0.3760	0.3112

Por su parte, la figura 7.2 muestra las curvas de comportamiento de la demanda durante el horizonte de planeación para cada uno de los productos. Las cifras de la demanda, muestran el comportamiento manifestado entre 2003 y 2004 por la empresa, en donde se aprecian ciertas depresiones entre los períodos 12 y 19, producto de la baja en la venta de automóviles en ese período. Como es evidente, de manera aproximada las autopartes seleccionadas muestran un comportamiento muy similar durante el

horizonte de estudio, situación que es muy factible encontrar en el sector de la automoción.

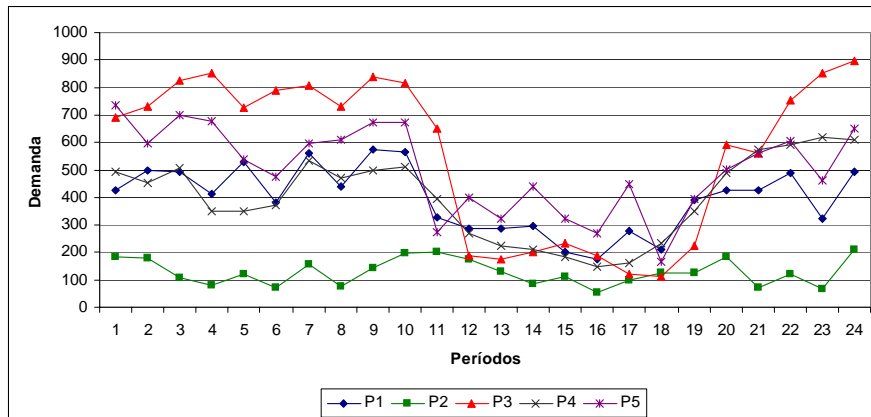


Figura 7.2
Variabilidad de la demanda

De acuerdo con los parámetros de coste y demanda, se determinó el coste de compra para cada uno de los productos y para los 24 períodos de estudio, mismos que se muestran en el cuadro 7.10.

Cuadro 7.10
Coste de compra o adquisición (dólares)

Período	Producto 1	Producto 2	Producto 3	Producto 4	Producto 5	Total
1	134,801.06	54,859.12	207,145.64	147,789.87	102,007.41	646,603.10
2	158,589.49	53,660.01	219,436.48	135,798.81	82,768.56	650,253.35
3	157,003.59	32,375.87	247,015.93	151,986.74	96,747.87	685,130.00
4	130,994.92	23,982.13	256,009.23	105,521.37	93,702.87	610,210.51
5	168,422.03	36,572.75	217,338.04	105,521.37	74,187.21	602,041.40
6	121,479.55	21,284.14	237,123.30	110,917.35	66,021.08	556,825.41
7	178,254.58	47,364.70	241,919.73	160,080.71	82,353.33	709,973.06
8	138,924.39	23,082.80	218,537.15	140,595.23	84,567.88	605,707.45
9	182,695.09	43,467.61	251,212.80	149,288.75	92,872.42	719,536.67
10	179,206.12	59,055.99	244,917.49	152,586.30	93,010.82	728,776.73
11	104,034.70	60,854.65	194,854.80	118,411.76	38,062.47	516,218.38
12	91,347.54	53,060.46	56,957.56	80,040.36	55,086.77	336,492.69
13	91,664.72	38,671.18	52,460.91	67,449.74	44,429.28	294,675.83
14	93,884.98	25,481.01	59,955.32	62,653.31	60,623.13	302,597.75
15	64,070.15	33,574.98	69,548.17	54,859.12	44,429.28	266,481.71
16	55,823.50	16,787.49	56,058.23	44,966.49	37,508.83	211,144.54
17	87,858.58	29,977.66	36,872.52	48,863.59	62,007.22	265,579.56
18	67,241.94	37,472.08	32,975.43	70,447.50	22,837.48	230,974.43
19	124,334.16	37,472.08	66,850.18	104,921.81	54,671.54	388,249.77
20	135,118.24	54,859.12	177,767.53	146,890.54	69,758.12	584,393.55
21	134,801.06	21,883.69	167,874.90	172,371.55	77,785.84	574,717.05
22	154,783.34	36,272.97	225,731.79	176,868.20	84,014.24	677,670.54
23	102,765.99	20,085.03	254,810.12	185,861.50	63,806.53	627,329.17
24	157,003.59	62,953.09	268,899.62	182,863.73	89,965.83	761,685.86
Total	3,015,103.32	925,110.63	4,062,272.88	2,877,555.71	1,673,225.98	12,553,268.53

Con la información anterior y la tarifa de transporte, se determinaron los costes totales de transporte que se muestran en el cuadro 7.12 para cada modo y período. Las

tarifas representan el coste por unidad transportada en un sistema de consolidación o “contenedor consolidado” (LCL: *Less Container Load*), del tipo que se plantea van Eijs (1994). Se adopta esta tarifa, debido a que la empresa proveedora consolida sus productos en sus almacenes locales y puertos de salida hacia el continente Europeo.

7.3 Diseño de la experimentación

Para llevar a cabo la evaluación de los modelos, con datos reales del caso de estudio, se han supuesto siete escenarios de análisis que describen las diferentes posiciones que pueden asumir el cliente y el proveedor. Dichos análisis, principalmente revelan la evolución de los beneficios (o pérdidas) que se podría obtener en caso de implementar la coordinación ECR para el control de inventarios. Vale decir también, que las comparaciones realizadas se refieren a una situación análoga a la utilizada en la evaluación económica de proyectos (véase, Jansson, 2000), la cual compara los resultados obtenidos de la puesta en marcha del proyecto (coordinación ECR) contra la alternativa de “no hacer nada” (sin coordinación). La descripción específica de cada uno de los escenarios operativos se presenta más adelante.

Cabe señalar que las dimensiones de los modelos del caso de estudio, que consideran cinco productos, tres modos de transporte y 24 períodos de planeación, en un ambiente de coordinación ExW, fue de 1,682 variables y 691 restricciones; para el *Incoterm* DDP, fue de 1,685 variables y 694 restricciones. En el cuadro 7.11, se demuestra que, para el caso en que se dupliquen los parámetros, las dimensiones del problema crece de manera drástica al igual que el tiempo de ejecución.

Cuadro 7.11
Dimensiones del problema y tiempo de ejecución

Número de productos (<i>n</i>)	5	10	20	40	
Número de modos (<i>m</i>)	3	6	12	24	
Períodos (<i>T</i>)	24	48	96	192	
Incoterm ExW	Variables= $2nT+n+4nmT-3$; Restricciones = $3n+2nT+nmT+5nm+1$				
	Número de variables	1,682	12,487	96,017	752,677
	Número de restricciones	691	4,171	28,141	204,601
	Tiempo de ejecución máx (seg)	2,415	17,932	137,886	1,080,888
	Tiempo de ejecución min (seg)	0.5	0.37	2.85	22.37
Incoterm DDP	Variables= $2nT+n+4nmT-3+m$; Restricciones= $3n+2nT+nmT+5nm+1+m$				
	Número de variables	1,685	12,493	96,029	752,701
	Número de restricciones	694	4,177	28,153	204,625
	Tiempo de ejecución máx (seg)	28.67	213	1,580	11,731
	Tiempo de ejecución min (seg)	0.06	0.4	3.3	24.5

Cuadro 7.12
Costes totales de transporte (dólares)

Modo																		
Periodo	1					2					3							
	Coste unitario de transporte (tarifa)																	
	\$4.16					\$1.89					\$1.04							
	Producto					Producto					Producto							
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5			
1	1,768.77	761.61	2,875.80	2,051.77	3,067.25	804.78	346.53	1,308.48	933.54	1,395.58	442.21	190.41	718.99	512.97	766.85			
2	2,080.90	744.96	3,046.44	1,885.30	2,488.76	946.80	338.95	1,386.12	857.80	1,132.37	520.25	186.25	761.65	471.35	622.22			
3	2,060.09	449.47	3,429.32	2,110.03	2,909.10	937.33	204.51	1,560.33	960.06	1,323.63	515.05	112.37	857.37	527.53	727.31			
4	1,718.82	332.94	3,554.18	1,464.95	2,817.54	782.06	151.49	1,617.13	666.55	1,281.97	429.73	83.24	888.59	366.26	704.42			
5	2,209.92	507.74	3,017.31	1,464.95	2,230.72	1,005.50	231.02	1,372.86	666.55	1,014.97	552.51	126.94	754.36	366.26	557.71			
6	1,593.97	295.49	3,291.98	1,539.87	1,985.18	725.25	134.45	1,497.84	700.63	903.25	398.51	73.88	823.04	384.99	496.32			
7	2,338.93	657.56	3,358.57	2,222.40	2,476.27	1,064.20	299.19	1,528.14	1,011.18	1,126.69	584.76	164.40	839.68	555.63	619.10			
8	1,822.87	320.46	3,033.95	1,951.88	2,542.86	829.40	145.81	1,380.43	888.10	1,156.99	455.74	80.12	758.52	487.99	635.75			
9	2,397.20	603.46	3,487.59	2,072.58	2,792.57	1,090.71	274.57	1,586.84	943.01	1,270.61	599.33	150.87	871.94	518.17	698.18			
10	2,351.42	819.87	3,400.19	2,118.36	2,796.73	1,069.88	373.04	1,547.07	963.84	1,272.50	587.88	204.98	850.09	529.61	699.22			
11	1,365.07	844.85	2,705.17	1,643.91	1,144.50	621.10	384.40	1,230.84	747.97	520.74	341.28	211.22	676.33	411.00	286.14			
12	1,198.60	736.64	790.74	1,111.20	1,656.40	545.36	335.17	359.78	505.59	753.65	299.66	184.17	197.70	277.81	414.12			
13	1,202.76	536.87	728.32	936.41	1,335.94	547.25	244.27	331.38	426.06	607.85	300.70	134.22	182.09	234.11	334.00			
14	1,231.89	353.75	832.36	869.82	1,822.87	560.51	160.96	378.72	395.76	829.40	307.99	88.44	208.10	217.46	455.74			
15	840.68	466.12	965.54	761.61	1,335.94	382.51	212.08	439.32	346.53	607.85	210.18	116.54	241.40	190.41	334.00			
16	732.48	233.06	778.26	624.27	1,127.85	333.27	106.04	354.10	284.04	513.17	183.13	58.27	194.57	156.08	281.98			
17	1,152.82	416.18	511.90	678.37	1,864.49	524.53	189.36	232.91	308.66	848.33	288.22	104.05	127.98	169.60	466.14			
18	882.30	520.23	457.80	978.02	686.70	401.44	236.70	208.30	445.00	312.44	220.59	130.06	114.46	244.52	171.68			
19	1,631.43	520.23	928.08	1,456.63	1,643.91	742.29	236.70	422.27	662.76	747.97	407.88	130.06	232.03	364.18	411.00			
20	1,772.93	761.61	2,467.95	2,039.28	2,097.55	806.67	346.53	1,122.90	927.86	954.37	443.25	190.41	617.02	509.85	524.41			
21	1,768.77	303.81	2,330.61	2,393.04	2,338.93	804.78	138.23	1,060.42	1,088.82	1,064.20	442.21	75.96	582.68	598.29	584.76			
22	2,030.96	503.58	3,133.84	2,455.46	2,526.21	924.08	229.13	1,425.88	1,117.22	1,149.42	507.76	125.90	783.50	613.90	631.58			
23	1,348.42	278.84	3,537.53	2,580.32	1,918.59	613.53	126.87	1,609.56	1,174.03	872.95	337.12	69.71	884.43	645.11	479.67			
24	2,060.09	873.98	3,733.13	2,538.70	2,705.17	937.33	397.66	1,698.56	1,155.10	1,230.84	515.05	218.51	933.33	634.71	676.33			
Suma	39,562.07	12,843.31	56,396.55	39,949.12	50,312.00	18,000.56	5,843.65	25,660.17	18,176.67	22,891.73	9,890.99	3,210.98	14,099.82	9,987.76	12,578.60			
	Coste total de transporte por el modo 1					199,063.06	Coste total de transporte por el modo 2					90,572.78	Coste total de transporte por el modo 3					49,768.16

7.3.1 Descripción de los escenarios de evaluación

Escenario 0. En este escenario, el cliente acude a la planta del proveedor para recoger su producto y asume todos los costes logísticos para el traslado de sus productos. En un ambiente no coordinado, se asume que el tamaño de la orden es definida por el cliente atendiendo a su lote económico, y corresponde a una política de abasto del tipo “*lote por lote*”; se usa predominantemente el mínimo coste como criterio principal y se utiliza el modo de transporte más barato (lento).

El proveedor, por su parte, se limita a asumir los costes fijos por atender cada orden que recibe de su cliente y por procesar cada producto incluido en la orden. El modelado se llevó a cabo con la aplicación de programa lineal multiobjetivo entero MMNC, presentado en el capítulo 5, que considera ambos criterios (coste y nivel de servicio de transporte) en un ambiente no coordinado.

El **escenario 1** establece una comparación de la práctica no coordinada basada en el coste, contra la estrategia coordinada que tiene en cuenta los criterios de coste y nivel de servicio del transporte en un ambiente de negociación del *Incoterm* ExW. Más específicamente, se plantea la comparación de un esquema donde los socios en la cadena de suministro no se coordinan, y el abasto de los productos se basa en un enfoque con prioridad del mínimo coste sin darle mayor importancia al nivel de servicio de transporte (menor coste y peor nivel de servicio), contra cada una de las soluciones de la estrategia coordinada, donde la preferencia a los criterios involucrados se intercambia. Es importante destacar que la estrategia coordinada en un contexto de negociación ExW, es modelada con el programa lineal multiobjetivo entero MMC-ExW propuesto (capítulo 5), el cual considera que el cliente asume los costes por el traslado de sus productos que adquiere en la planta del proveedor.

El **escenario 2** plantea hacer una comparación de la práctica no coordinada contra la estrategia coordinada teniendo en cuenta los criterios de coste y nivel de servicio del transporte en un ambiente de negociación ExW. Este escenario supone que en la práctica no coordinada, la preferencia a los criterios involucrados se intercambia para definir las diferentes opciones de solución (curva Pareto), que son comparadas una a una contra las opciones obtenidas para el caso coordinado, el cual también tiene en cuenta ambos criterios.

El **escenario 3** plantea la comparación de una práctica no coordinada basada en el nivel de servicio de transporte, contra la estrategia coordinada que tiene en cuenta los criterios de coste y nivel de servicio del transporte en un ambiente de negociación ExW. Para ser más específicos, este escenario propone la comparación de un esquema cuando los socios en la cadena de suministro no se coordinan, y donde el abasto de los productos se basa en un enfoque con prioridad al nivel de servicio de transporte, sin darle mayor importancia al coste (es decir, peor coste y mejor nivel de servicio), contra cada una de las soluciones de una estrategia coordinada, donde la preferencia a los criterios involucrados se intercambia (es decir, que existe *tradeoff*). Nuevamente, cabe aclarar que la estrategia coordinada en un contexto de negociación ExW, es modelada también con el programa lineal multiobjetivo entero MMC-ExW.

En el **escenario 4** se compara la práctica no coordinada basado en el coste contra la estrategia coordinada que tiene en cuenta los criterios de coste y nivel de servicio del transporte, pero ahora en un ambiente de negociación DDP. Nuevamente se hace la comparación de la solución extrema que el cliente y proveedor pueden asumir basada en el coste (mínimo coste y peor nivel de servicio de transporte) contra cada una de las soluciones coordinadas en un ambiente negociación DDP, que tiene en cuenta el intercambio del nivel de preferencia de los criterios involucrados. Cabe señalar, que la estrategia coordinada en un contexto de negociación DDP, es modelada con el programa lineal multiobjetivo entero MMC-DDP, el cual considera que el proveedor lleva a cabo todas las actividades logísticas para el traslado de los productos al local del comprador, que incluye la negociación de las tarifas de transporte.

En el **escenario 5** se establece la comparación de la práctica no coordinada contra la estrategia coordinada que tiene en cuenta los criterios de coste y nivel de servicio del transporte en un ambiente de negociación DDP. En este escenario se supone que en la estrategia no coordinada, la preferencia a los criterios involucrados se intercambia para definir las diferentes opciones de solución, que son comparadas una a una contra las opciones obtenidas para el caso coordinado DDP, el cual también tiene en cuenta ambos criterios.

Finalmente, en el **escenario 6** se plantea la comparación de la práctica no coordinada basada en el nivel de servicio de transporte contra la estrategia coordinada que tiene en cuenta los criterios de coste y nivel de servicio del transporte en un

ambiente de negociación DDP. Para ser más específicos, este esquema plantea la comparación de una situación donde los socios en la cadena de suministro no se coordinan, y el abasto de los productos se basa en un enfoque con prioridad al nivel de servicio de transporte, sin darle mayor importancia al coste (es decir, peor coste y mejor nivel de servicio), contra cada una de las soluciones de la estrategia coordinada, donde la preferencia a los criterios involucrados se intercambia. Cabe señalar, que en este caso, la estrategia coordinada en el contexto de negociación DDP, es modelada también con el programa lineal multiobjetivo entero MMC-DDP.

El cuadro 7.13 presenta un resumen de los esquemas propuestos, el cual permite observar los criterios considerados en cada escenario en la comparación del esquema “sin coordinación” contra la estrategia “coordinada”, marcados éstos con el símbolo .

Cuadro 7.13
Resumen de comparación de los escenarios propuestos

Comparación de escenarios		Coordinado			Tipo de <i>Incoterm</i>
		Criterios	Coste	Nivel de servicio	
Sin coordinación	Escenario 0	Coste	x	x	(1)
		Nivel de servicio	x	x	
	Escenario 1	Coste	✓	✓	ExW
		Nivel de servicio	x	x	
	Escenario 2	Coste	✓	✓	ExW
		Nivel de servicio	✓	✓	
	Escenario 3	Coste	x	x	ExW
		Nivel de servicio	✓	✓	
	Escenario 4	Coste	✓	✓	DDP
		Nivel de servicio	x	x	
	Escenario 5	Coste	✓	✓	DDP
		Nivel de servicio	✓	✓	
	Escenario 6	Coste	x	x	DDP
		Nivel de servicio	✓	✓	

Nota (1): En este escenario se podría considerar que el *incoterm* empleado es del tipo ExW, en un contexto no coordinado considerando ambos criterios. En este caso no se indica el símbolo porque no se compara contra el esquema coordinado.

Los escenarios antes descritos, fueron diseñados para que cada uno los socios comerciales involucrados (cliente y proveedor) conozcan las diferentes perspectivas de solución y conducta que podrían asumir sobre la toma de decisiones. El objetivo fundamental de este análisis busca identificar los segmentos de oportunidad para la coordinación ECR para el control de inventarios y el suministro de autopartes por medio de tres modos de transporte.

7.3.2 Medidas de desempeño para evaluar los beneficios de la estrategia ECR

La instrumentación de la estrategia ECR para la coordinación del abastecimiento y la gestión de los inventarios entre un cliente y un proveedor, es apropiada cuando los resultados de su aplicación producen beneficios para ambos y para el sistema en su conjunto (cliente-proveedor). La evaluación de su influencia en el contexto coordinado, está determinada por la comparación de los resultados alcanzados contra los resultados de una política no coordinada.

De esta manera, las medidas de desempeño que se utilizan para decidir si es benéfica o no la coordinación ECR, son: el porcentaje de ahorro en los costes incurridos por el cliente y el proveedor al usar la estrategia ECR, así como el porcentaje de ahorro en la suma de los costes incurridos por el sistema en su conjunto. Las expresiones 7.3, 7.4 y 7.5, presentan el ratio de las variables que determinan dichas circunstancias para el tipo de negociación ExW, en términos del coste.

$$\text{Ahorro o pérdida del cliente} = \frac{\sum_i g_{li}^{nC} - g_1^{CoExW}}{\sum_i g_{li}^{nC}} \times 100\% \quad (7.3)$$

$$\text{Ahorro o pérdida del proveedor} = \frac{g_0^{nC} - g_0^{CoExW}}{g_0^{nC}} \times 100\% \quad (7.4)$$

$$\text{Ahorro o pérdida del sistema} = \frac{\left(\sum_i g_{li}^{nC} - g_1^{CoExW} \right) - \left(g_0^{nC} - g_0^{CoExW} \right)}{\left(\sum_i g_{li}^{nC} - g_1^{CoExW} \right)} \times 100\% \quad (7.5)$$

Las expresiones 7.6, 7.7 y 7.8, presentan el ratio de las variables que determinan los beneficios o pérdidas en términos del coste y para el tipo de negociación DDP.

$$\text{Ahorro o pérdida del cliente} = \frac{\sum_i g_{li}^{nC} - g_1^{CoDDP}}{\sum_i g_{li}^{nC}} \times 100\% \quad (7.6)$$

$$\text{Ahorro o pérdida del proveedor} = \frac{g_0^{nC} - g_0^{CoDDP}}{g_0^{nC}} \times 100\% \quad (7.7)$$

$$\text{Ahorro o pérdida del cliente} = \frac{\left(\sum_i g_{li}^{nC} - g_1^{CoDDP} \right) - \left(g_0^{nC} - g_0^{CoDDP} \right)}{\left(\sum_i g_{li}^{nC} - g_1^{CoDDP} \right)} \times 100\% \quad (7.8)$$

Debido a la aplicación multicriterio en los modelos propuestos, los beneficios no sólo pueden ser vistos desde una perspectiva simplista basada en el coste, sino también los resultados pueden ser evaluados teniendo en cuenta el efecto de combinar diferentes alternativas de transporte en un contexto coordinado, contra el nivel de servicio de transporte en un esquema no coordinado. Las medidas de desempeño en este sentido, son: el porcentaje de mejora o pérdida del nivel de servicio de transporte (NS) para cada tipo de negociación del comercio internacional. Las expresiones 7.9 y 7.10 presentan el ratio de las variables que determinan los beneficios o pérdidas del nivel de servicio de transporte para el tipo de negociación ExW y DDP.

$$\text{Mejora o pérdida del NS}_{-ExW} = \frac{\sum_i g_{li}^{ef} - g_1^{efExW}}{\sum_i g_{li}^{ef}} \times 100\% \quad (7.9)$$

$$\text{Mejora o pérdida del NS}_{-DDP} = \frac{\sum_i g_{li}^{ef} - g_1^{efDDP}}{\sum_i g_{li}^{ef}} \times 100\% \quad (7.10)$$

De la misma manera, el nivel de las inversiones sobre la necesidad de mejorar los sistemas operativos, implica conocer la medida de desempeño de dicha inversión, en este caso, se define a través del índice del nivel de servicio como el ratio del nivel de servicio alcanzado y el coste total del sistema de cada alternativa.

$$\text{Índice de nivel de servicio de transporte (INS}_{-NC}) = \frac{NS_{-No\ coordinado}}{Coste\ Total} \quad (7.11)$$

$$\text{Índice de nivel de servicio de transporte (INS}_{-ExW}) = \frac{NS_{-ExW}}{Coste\ Total} \quad (7.12)$$

$$\text{Índice de nivel de servicio de transporte (INS}_{-DDP}) = \frac{NS_{-DDP}}{Coste\ Total} \quad (7.13)$$

7.4 Análisis operativo de los modelos y comparación de las fronteras Pareto

En esta sección se presenta el análisis de los resultados obtenidos a partir de la aplicación de la metodología propuesta que resuelve los modelos para la coordinación de inventarios. Dichos resultados se generan a partir de 50 corridas de computadora para cada tipo de *Inco term* y por política de coordinación. Es decir, se realizaron 250 procesos, de los cuales se obtuvieron entre 25 y 28 soluciones no dominadas y no

repetidas para cada caso. Es importante recordar que el método de los pesos ponderados tiene la desventaja de repetir soluciones ya encontradas, por lo que en muchas ocasiones resultó innecesario llevar a cabo un mayor número de procesos. Dichas aplicaciones computacionales se llevaron a cabo con una interfase entre los software comerciales Lindo (2002) y Cplex (2005).

Como ya se dijo, el análisis se lleva a cabo para siete escenarios, los cuales fundamentalmente se compara la frontera Pareto no coordinada (escenario 0) contra la frontera Pareto de los escenarios que utilizan la estrategia de coordinación ECR entre cliente y proveedor, en el contexto de los *Incoterms* ExW y DDP. De manera especial, en esta parte de la tesis se describe la compensación que surge de preferir el criterio coste por el nivel de servicio de transporte y viceversa (*tradeoff*), permitiendo establecer las cotas inferiores y superiores para la toma de decisiones.

7.4.1 Análisis operativo del modelo. Escenario 0

Escenario 0. Esquema no coordinado cliente – proveedor teniendo en cuenta los criterios de coste y nivel de servicio del transporte en un ambiente de negociación tipo ExW.

- a. En un ambiente no coordinado, las acciones basadas con preferencia al coste como criterio de decisión, permiten observar que el cliente puede lograr el menor coste total en su esquema de abastecimiento utilizando los modos de transporte “más baratos” (o más lentos o menos confiables o con el peor nivel de servicio) para el traslado de sus productos (véase opción número 1 en el cuadro 7.14). En dicho cuadro, se observa que un cambio en las preferencias, con dirección al nivel de servicio de transporte, el coste total del cliente es peor (columna 6), pero se logra una mejora sustancial en el nivel de servicio (columna 9). De aquí en adelante, los cuadros y figuras que contengan el nivel de servicio del transporte, se asumirá que el símbolo negativo significará que “*menos es mejor*”.
- b. Bajo este esquema o criterio de operación, se ha observado que son más comunes las fallas en el sistema de inventarios en virtud de los problemas que provocan los servicios de transporte poco confiables y con grandes tiempos de entrega. De hecho, los resultados sobre los costes de inventario en tránsito y de transporte

mostraron magnitudes similares; en la figura 7.3, éstos representan los componentes principales de la estructura de costes del cliente (véase figura 7.3).

Cuadro 7.14
Costes del cliente-proveedor no coordinados (Soluciones no dominadas)

Dirección	Número de opciones	Costes del cliente					Coste del proveedor	Coste total del sistema no coordinado	Nivel de servicio del transporte	
		Ordenar	Inventario	Inventario en tránsito	Transporte	Total				
(1)	(2)	(3)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	
Preferencia al coste →	Preferencia al nivel de servicio del transporte	1	10,441	-	57,448	60,657	128,547	54,000	182,547	-1257881
		2	10,441	-	53,251	64,970	128,663	54,000	182,663	-1329676
		3	10,441	-	54,902	63,247	128,590	54,000	182,590	-1300992
		4	10,441	-	51,151	67,083	128,675	54,000	182,675	-1364835
		5	10,441	-	51,151	67,083	128,675	54,000	182,675	-1364835
		6	10,441	-	51,151	67,083	128,675	54,000	182,675	-1364835
		7	10,441	-	51,151	67,083	128,675	54,000	182,675	-1364835
		8	10,441	-	49,004	69,407	128,852	54,000	182,852	-1403516
		9	10,441	-	49,512	69,112	129,065	54,000	183,065	-1398617
		10	10,441	-	49,004	69,407	128,852	54,000	182,852	-1403516
		11	10,441	-	49,004	69,407	128,852	54,000	182,852	-1403516
		12	10,441	-	49,004	69,407	128,852	54,000	182,852	-1403516
		13	10,441	-	40,705	79,753	130,899	54,000	184,899	-1575733
		14	10,441	-	40,705	79,753	130,899	54,000	184,899	-1575733
		15	10,441	-	40,705	79,753	130,899	54,000	184,899	-1575733
		16	10,441	-	36,032	90,892	137,365	54,000	191,365	-1778034
		17	10,441	-	24,642	128,851	163,934	54,000	217,934	-2476842
		18	10,441	-	14,821	199,063	224,325	54,000	278,325	-3826480
		19	10,441	-	14,821	199,063	224,325	51,300	278,325	-3826480
		20	10,441	-	14,821	199,063	224,325	49,680	278,325	-3826480
		21	10,441	-	14,821	199,063	224,325	48,060	278,325	-3826480
		22	10,441	-	14,821	199,063	224,325	45,900	278,325	-3826480
		23	10,441	-	14,821	199,063	224,325	43,740	278,325	-3826480
		24	10,441	-	14,821	199,063	224,325	42,120	278,325	-3826480
		25	10,441	-	14,821	199,063	224,325	27,000	278,325	-3826480
		26	10,156	1,850	14,728	199,063	225,798	32,400	279,798	-3826480
		27	9,406	8,004	14,334	199,063	230,807	16,200	284,807	-3826480
		28	9,406	8,004	14,334	199,063	230,807	9,900	284,807	-3826480

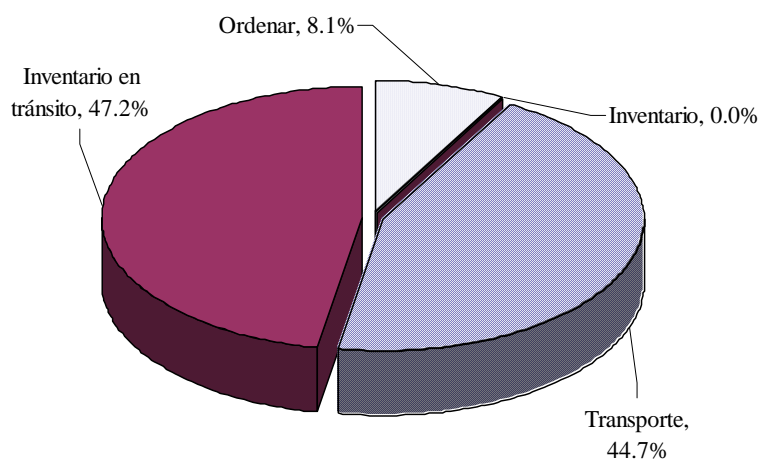


Figura 7.3
Estructura de costes del cliente (no coordinado)
con énfasis en el coste (Escenario 0)

- c. Por lo que respecta al proveedor, en el cuadro 7.14, se observa que sus costes fijos no muestran alguna modificación de importancia; la justificación de este hecho

fundamentalmente se debe a la práctica de su cliente por mantener inventarios al más bajo nivel, con lo cual no le permite alguna tipo de consolidación significativa para administrar mejor sus envíos.

- d. En general, el uso multicriterio por parte del cliente en un ambiente no coordinado permite observar un comportamiento adecuado del modelo. Los resultados demuestran que el coste por ordenar sigue una tendencia basada en una política de lote por lote (inventario cero) definida a partir de los altos costes que representa el almacenamiento de los productos automotrices. Por esta razón, a partir de un enfoque basado en los costes, y no en el nivel de servicio, en el cuadro 7.15 se observa que los costes de inventario en tránsito (columna 5) y de transporte (columna 6) son muy similares (44% por 48%). En la medida en que esta perspectiva se modifica, considerando más el nivel de servicio de transporte, la tendencia es hacia una reducción de los costes de inventario en tránsito por un aumento sustancial en los costes de transporte. De hecho, la estructura de costes del cliente muestra que estos dos conceptos intercambian su participación, hasta que el transporte representa casi el 90% cuando alcanza su mayor nivel de servicio.

Cuadro 7.15
Estructura de costes del cliente no coordinado

Dirección	Número de opción	Ordenar	Inventario	Inventario en tránsito	Transporte	Total
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
↑ Preferencia al coste ↓ Preferencia al nivel de servicio del transporte	1	8.1%	0.0%	44.7%	47.2%	100.0%
	2	8.1%	0.0%	41.4%	50.5%	100.0%
	3	8.1%	0.0%	42.7%	49.2%	100.0%
	4	8.1%	0.0%	39.8%	52.1%	100.0%
	5	8.1%	0.0%	39.8%	52.1%	100.0%
	6	8.1%	0.0%	39.8%	52.1%	100.0%
	7	8.1%	0.0%	39.8%	52.1%	100.0%
	8	8.1%	0.0%	38.0%	53.9%	100.0%
	9	8.1%	0.0%	38.4%	53.5%	100.0%
	10	8.1%	0.0%	38.0%	53.9%	100.0%
	11	8.1%	0.0%	38.0%	53.9%	100.0%
	12	8.1%	0.0%	38.0%	53.9%	100.0%
	13	8.0%	0.0%	31.1%	60.9%	100.0%
	14	8.0%	0.0%	31.1%	60.9%	100.0%
	15	8.0%	0.0%	31.1%	60.9%	100.0%
	16	7.6%	0.0%	26.2%	66.2%	100.0%
	17	6.4%	0.0%	15.0%	78.6%	100.0%
	18	4.7%	0.0%	6.6%	88.7%	100.0%
	19	4.7%	0.0%	6.6%	88.7%	100.0%
	20	4.7%	0.0%	6.6%	88.7%	100.0%
	21	4.7%	0.0%	6.6%	88.7%	100.0%
	22	4.7%	0.0%	6.6%	88.7%	100.0%
	23	4.7%	0.0%	6.6%	88.7%	100.0%
	24	4.7%	0.0%	6.6%	88.7%	100.0%
	25	4.7%	0.0%	6.6%	88.7%	100.0%
	26	4.5%	0.8%	6.5%	88.2%	100.0%
	27	4.1%	3.5%	6.2%	86.2%	100.0%
	28	4.1%	3.5%	6.2%	86.2%	100.0%

- e. En la figura 7.4, se muestran las soluciones no dominadas para el caso bicriterio del cliente en el contexto no coordinado. Dichas soluciones dibujan la curva Pareto de las posibles soluciones, y son el resultado obtenido con la técnica de los pesos ponderados.

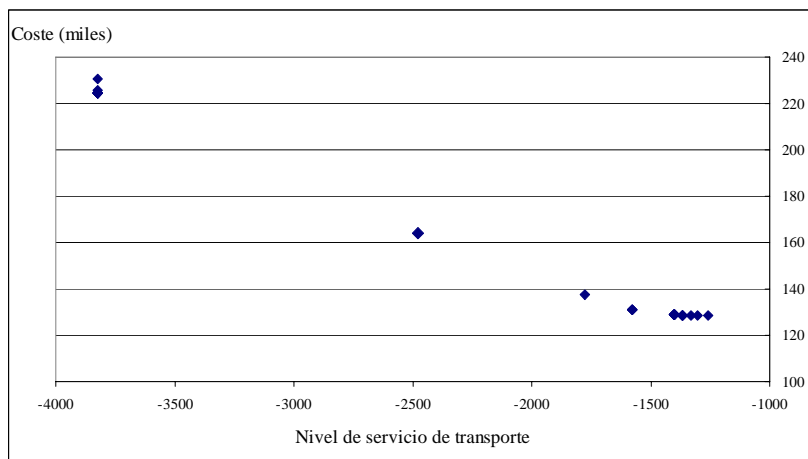


Figura 7.4
Soluciones no dominadas del cliente sin coordinación

7.4.2 Análisis operativo del modelo y frontera Pareto. Escenario 1

Escenario 1: Esquema no coordinado basado en el coste contra un esquema coordinado, teniendo en cuenta los criterios de coste y nivel de servicio del transporte en un ambiente de negociación ExW.

Para el caso del escenario 1, en la figura 7.5 se compara la alternativa no coordinada (A_{NC}) contra la alternativa coordinada en el contexto ExW para el cliente. El símbolo en círculo indica la solución no dominada cuando la política de inventarios es no-coordinada $A_{NC}(C_1, Ns_1)$; esto es, el cliente realiza sus compras de acuerdo a su política de coste mínimo y el proveedor surte los pedidos que se acumulan por período. Los símbolos en cuadro corresponden a soluciones no dominadas cuando se sincroniza la decisión de abasto. En la figura, es claro observar que la alternativa no coordinada es mejor en coste pero no en nivel de servicio de transporte con relación a cualquier solución de la alternativa coordinada, por lo tanto, cambiar a un esquema coordinado le representa al cliente una pérdida en coste pero una ganancia en nivel de servicio en su abastecimiento. La figura, muestra la cota inferior en coste y nivel de servicio $A_{Ci}(C_2, Ns_2)$ y la cota superior $A_{Cs}(C_3, Ns_3)$ los cuales representan los puntos extremos para seleccionar una alternativa si se decidiera cambiar a un esquema coordinado.

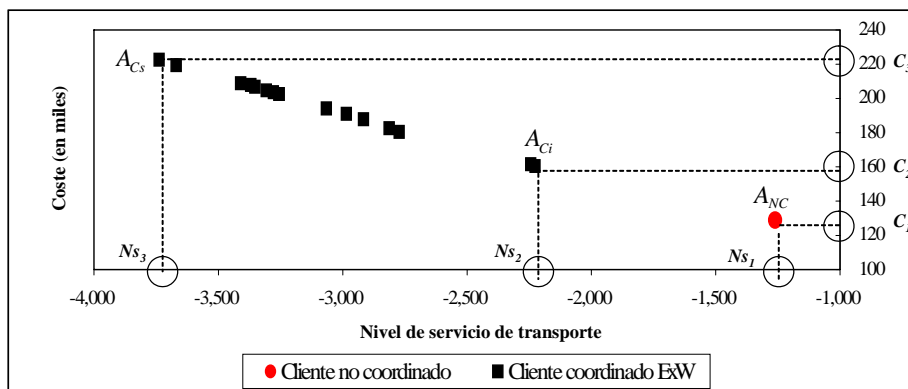


Figura 7.5
Frontera eficiente del cliente (Escenario 1)
(No coordinado con énfasis en el coste)

Por su parte, en la figura 7.6 se compara la alternativa no coordinada (A_{NC}) contra la alternativa coordinada en el contexto ExW para el proveedor. En dicha figura se observa que $A_{NC}(C_1, Ns_1)$ representa la alternativa no coordinada, la cual establece el punto de referencia del proveedor para implementar un esquema coordinado.

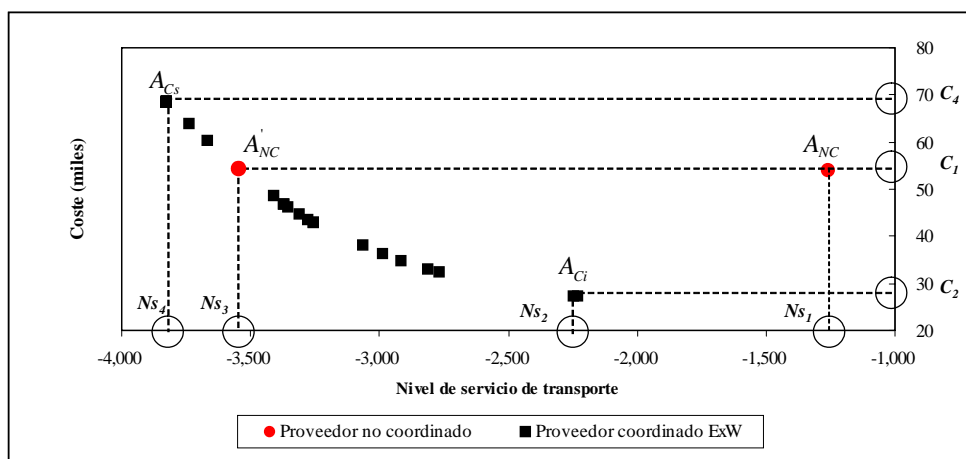


Figura 7.6
Frontera eficiente del proveedor (Escenario 1)
(No coordinado con énfasis en el coste)

Procediendo a la proyección de la alternativa no coordinada al punto $A'_{NC}(C_1, Ns_3)$ en la figura anterior, se distingue que el proveedor puede aumentar el nivel de servicio de transporte con el mismo coste desde un enfoque coordinado.

Desde este punto de vista, se comprueba que es posible llevar a cabo una reducción en el coste y al mismo tiempo aumentar el nivel de servicio de transporte en el segmento de la curva entre la cota inferior $A_{Ci}(C_2, Ns_2)$ y la proyección

$A'_{NC}(C_1, N_{S_3})$. Esto último significa que la alternativa no coordinada es dominada por la solución que representa la cota inferior y por un conjunto de soluciones sobre la frontera eficiente hasta el punto $A'_{NC}(C_1, N_{S_3})$; más específicamente, la coordinación cumple cabalmente con las funciones objetivos propuestas en este rango -minimizar el coste y maximizar el nivel de servicio de transporte. Finalmente, en el intervalo $[A_{C_3}(C_4, N_{S_4}), A'_{NC}(C_1, N_{S_3})]$ se encuentran las soluciones débilmente no dominadas en un ambiente de coordinación con respecto a la alternativa no coordinada.

Asimismo, en la figura 7.7 se compara la alternativa no coordinada (A_{NC}) contra la alternativa coordinada en el contexto ExW para el sistema cliente-proveedor. En dicha figura se observa de antemano que $A_{NC}(C_1, N_{S_1})$, representa la alternativa que establece el punto de referencia del sistema para analizar la implementación de la política coordinada. Es claro observar nuevamente, que la alternativa no coordinada es mejor en coste pero no en nivel de servicio de transporte con relación a cualquier solución de la alternativa coordinada, por tanto, cambiar a un esquema coordinado le representa al sistema un mayor coste pero una ganancia en el nivel de servicio en el abastecimiento. Dicha figura muestra la cota inferior $A_{C_i}(C_2, N_{S_2})$, y la cota superior $A_{C_s}(C_3, N_{S_3})$ en coste y nivel de servicio, los cuales representan los puntos extremos para seleccionar una alternativa si se decidiera cambiar a un esquema coordinado.

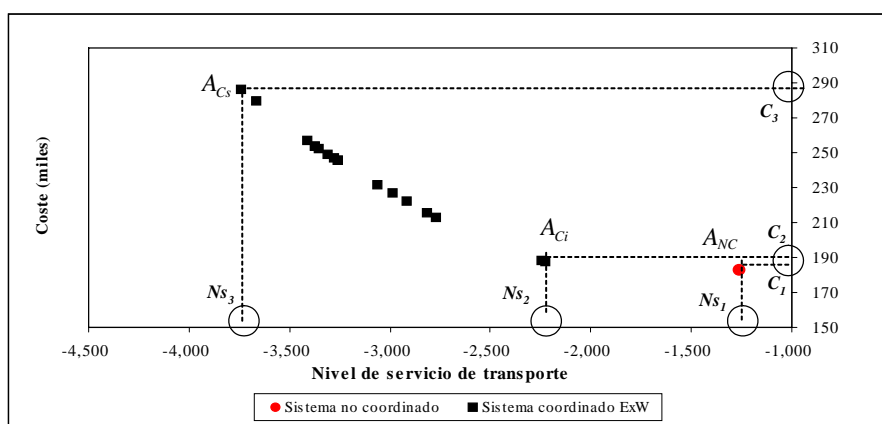


Figura 7.7
Frontera eficiente del sistema (Escenario 1)
(No coordinado con énfasis en el coste)

A partir de las figuras antes descritas, y a manera de conclusión, puede establecerse que el esquema coordinado no es conveniente para el cliente y sí para el

proveedor. Desde el punto de vista del sistema, es claro observar que la alternativa coordinada no tiene efecto positivo para el sistema (cliente-proveedor) si este funciona sólo basado en el coste, es decir, si no tiene en cuenta el criterio de nivel de servicio. La posible instrumentación de un esquema coordinado en este contexto, parece no muy recomendable desde el punto de vista para el sistema, debido a que las pérdidas del cliente superan las ganancias del proveedor, provocando resultados negativos.

7.4.3 Análisis operativo del modelo y frontera Pareto. Escenario 2

Escenario 2: Esquema no coordinado contra esquema coordinado teniendo en cuenta los criterios de coste y nivel de servicio del transporte en un ambiente de negociación ExW.

La figura 7.8 muestra la comparación de las soluciones no dominadas en el contexto no coordinado, contra las soluciones derivadas cuando se aplica la estrategia de coordinación ECR en un ambiente de negociación ExW, y cuando el cliente considera simultáneamente el criterio de costes y el de nivel de servicio de transporte. Los símbolos en círculo indican soluciones no dominadas cuando la política de inventarios es no coordinada; esto es, el cliente realiza sus compras de acuerdo a su política de coste mínimo y el proveedor surte los pedidos que se acumulan por período. Los símbolos en cuadro corresponden a soluciones no dominadas cuando se sincroniza la decisión de abasto. La frontera no dominada del problema con coordinación claramente es superada por la frontera no dominada de la política sin coordinación. Esto significa que la coordinación no es conveniente para el cliente, sobre todo cuando el énfasis de la decisión está basado en el coste.

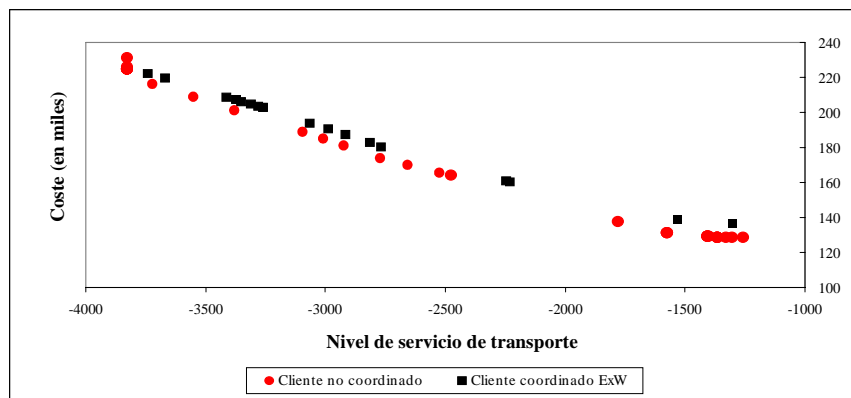


Figura 7.8
Frontera eficiente del cliente (Escenario 2)
(No coordinado considerando ambos criterios)

En la medida que se prefiere el nivel de servicio, se observa que ambas fronteras eficientes se van acercando paulatinamente, dando como resultados que algunas alternativas en esta dirección casi convergen.

En la figura 7.9 se muestran las curvas Pareto que describen las alternativas de solución para el proveedor bajo el esquema no coordinado y coordinado. En dicha figura se observa el desarrollo de cada una de las alternativas en ambos contextos. Como es evidente, las alternativas para el caso no coordinado mantienen una constante en términos del coste con incrementos en el nivel de servicio.

Por su parte, las alternativas coordinadas (soluciones no dominadas) muestran claramente que el proveedor tiene diversas opciones que le permite minimizar su coste y aumentar el nivel de servicio de transporte, entre el segmento $A_{Ci}(C_2, Ns_2)$ y el punto $A_{NC} \approx A_C$, lugar donde se interceptan ambas curvas.

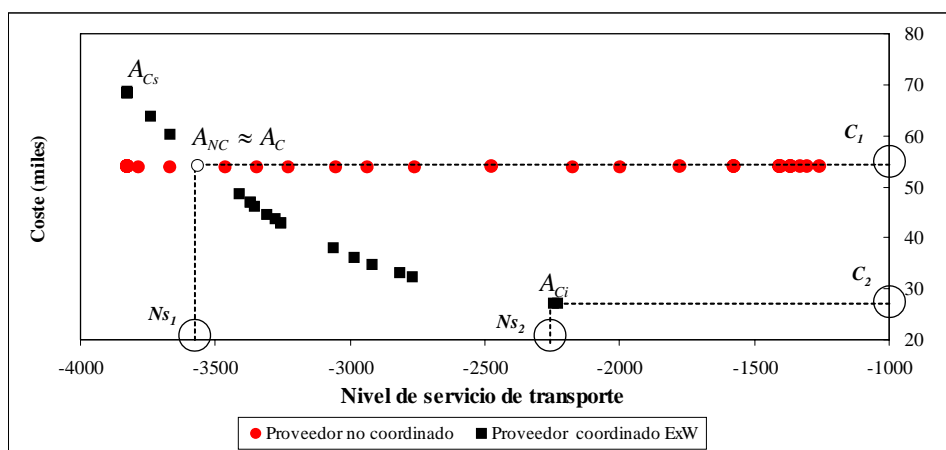


Figura 7.9
Frontera eficiente del proveedor (Escenario 2)
(No coordinado considerando ambos criterios)

Por lo que se refiere al sistema en su conjunto (cliente-proveedor), en la figura 7.10 se aprecia que la frontera no dominada del problema con coordinación claramente supera a la frontera no dominada de la política sin coordinación. Sin embargo, en la medida en que se prefiere dar mayor importancia al nivel de servicio de transporte, la situación se invierte en el momento en que se interceptan las curvas eficientes en el punto $A_{NC} \approx A_C$, el cual podría también interpretarse como la cota superior en la que es más rentable la coordinación, a partir de un diferenciado nivel de servicio.

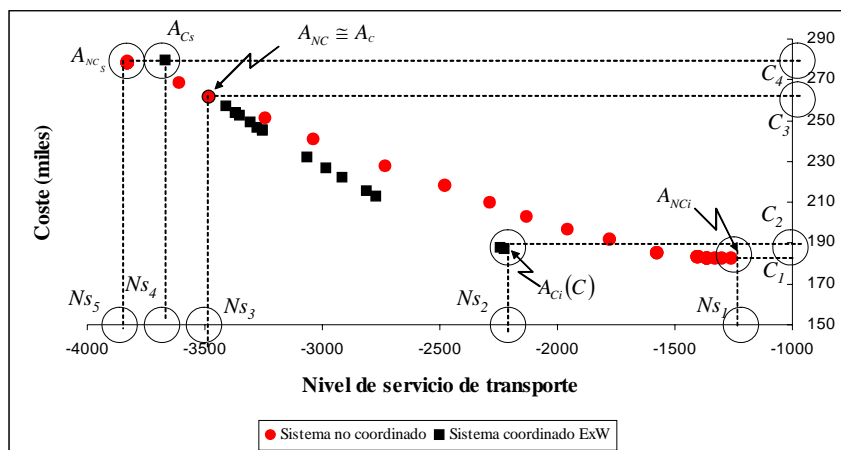


Figura 7.10
Frontera eficiente del sistema (Escenario 2)
(No coordinado considerando ambos criterios)

7.4.4 Análisis operativo del modelo y frontera Pareto. Escenario 3

Escenario 3: Esquema no coordinado basado en el nivel de servicio de transporte contra esquema coordinado teniendo en cuenta los criterios de coste y nivel de servicio del transporte en un ambiente de negociación ExW.

La figura 7.11 presenta una muestra de las soluciones obtenidas del modelo, las cuales forman parte de la frontera eficiente del cliente desde el punto de vista coordinado. En la figura, se observa el punto de referencia A_{NC} que representa el vector de los criterios del cliente en el contexto no coordinado (C_1, N_{S_1}) , con un enfoque basado en el nivel de servicio del transporte.

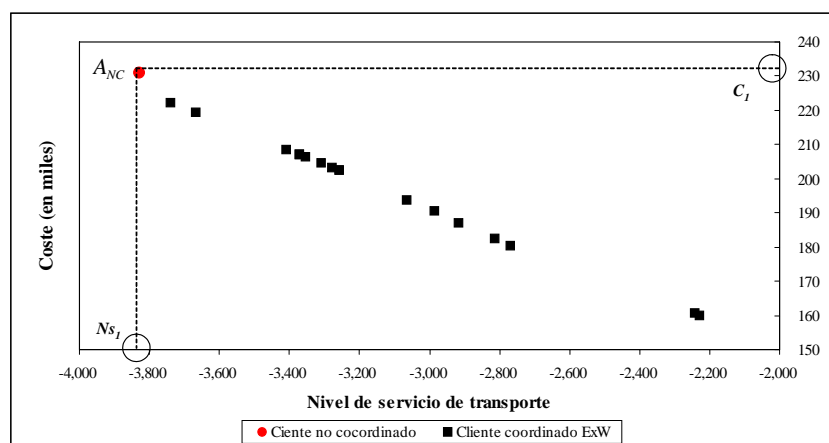


Figura 7.11
Frontera eficiente del cliente (Escenario 3)
(No coordinado con énfasis en el nivel de servicio de transporte)

En la figura anterior, la solución no coordinada domina a las soluciones coordinadas en lo que se refiere al nivel de servicio, pero es dominada en el criterio de coste. Esta lectura, permite deducir que el cliente puede lograr adecuados niveles de servicio de transporte sin necesidad de utilizar la cota superior obtenida por la alternativa no coordinada. Ello permitirá ahorros sustanciales en términos del coste.

En la figura 7.12 se presenta una muestra de las soluciones eficientes del proveedor bajo un esquema coordinado. También, se observa el punto A_{NC} , el cual representa la solución no coordinada basada en el nivel de servicio de transporte. En dicha figura, se aprecia que la solución A_{NC} se encuentra ubicada por debajo de la curva eficiente de soluciones coordinadas, lo que permite identificar que es mejor que algunas de éstas. Llevando a cabo una proyección del punto A_{NC} al punto $A'_{NC}(C_1, Ns_2)$, es factible identificar la zona dónde la coordinación no es recomendable para el proveedor. De hecho, el segmento de la curva $A'_{NC}(C_1, Ns_2) - A_C(C_2, Ns_3)$ contiene el conjunto de soluciones no dominadas más rentables para el proveedor si se utiliza la coordinación ECR en el contexto ExW. Por supuesto, dichos límites representan la cota inferior y superior bajo el cual, el proveedor podrá tomar decisiones sobre la adopción de la política de coordinación.

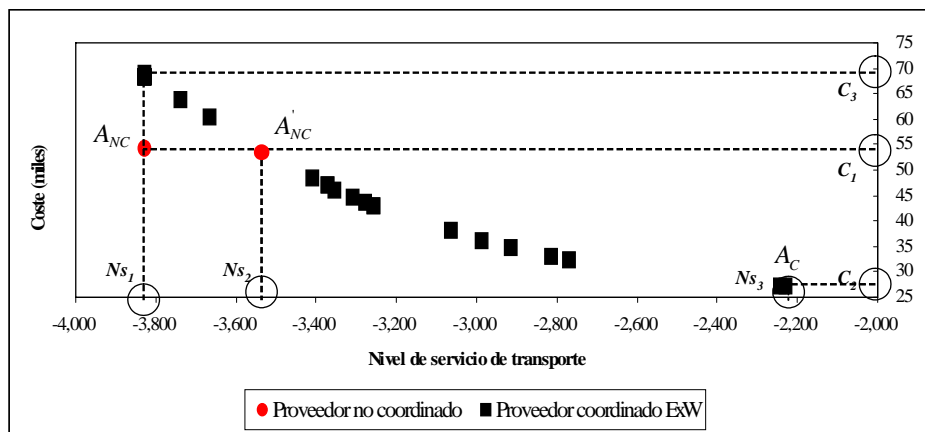


Figura 7.12
Frontera eficiente del proveedor (Escenario 3)
(No coordinado con énfasis en el nivel de servicio de transporte)

Por lo que respecta al sistema cliente-proveedor, puede observarse que la solución no coordinada con un enfoque basado en el nivel de servicio de transporte, presenta el mejor nivel de servicio, pero el peor coste en comparación con las alternativas coordinadas. La curva en la figura 7.13 permite ver esta situación, en la cual, tanto el

cliente como el proveedor, podrían acordar niveles de servicio por debajo del óptimo, pudiendo lograr con ello, ahorros sustanciales en el sistema con adecuados niveles de servicio en materia de transporte. Es evidente que la alternativa no coordinada con este enfoque, representa el caso extremo de ofrecer el máximo nivel de servicio, sin embargo, suele ser una opción poco práctica debido a los costes que suponen. En general, la curva de eficiencia para el caso coordinado, ofrece una visión de la cota superior e inferior donde pueden moverse el cliente y el proveedor para lograr el menor coste y el mejor nivel de servicio de transporte.

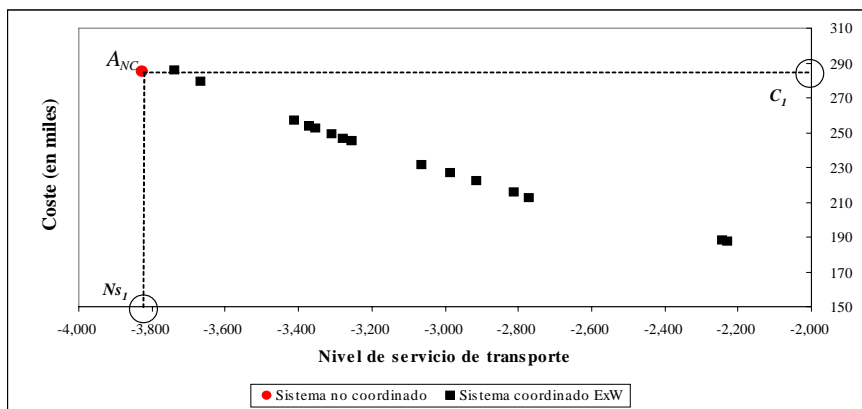


Figura 7.13
Frontera eficiente del sistema (Escenario 3)
(No coordinado con énfasis en el nivel de servicio de transporte)

7.4.5 Análisis operativo del modelo y frontera Pareto. Escenario 4

Escenario 4: Esquema no coordinado basado en el coste contra esquema coordinado teniendo en cuenta los criterios de coste y nivel de servicio del transporte en un ambiente de negociación DDP.

En la figura 7.14 se observa que la alternativa no coordinada del cliente, basada en el criterio del coste, está claramente dominada por todas las opciones coordinadas en el contexto DDP. En dicha figura, es evidente que en un esquema coordinado, donde el proveedor se hace cargo de negociar las tarifas de transporte (*Incoterm* DDP), los criterios de coste y nivel de servicio del transporte son mejores que la solución no coordinada del cliente, representada por el punto A_{NC} . Asimismo, se observa que las funciones objetivo del modelo se satisfacen fehacientemente en un esquema coordinado, es decir, se maximiza el nivel de servicio de transporte y se minimiza el coste total del cliente, por supuesto, los resultados obtenidos permiten fijar las cotas en las que el

cliente puede lograr que el transporte ofrezca mejores niveles de servicio y se reduzcan sus costes totales (A_{Ci} y A_{Cs}).

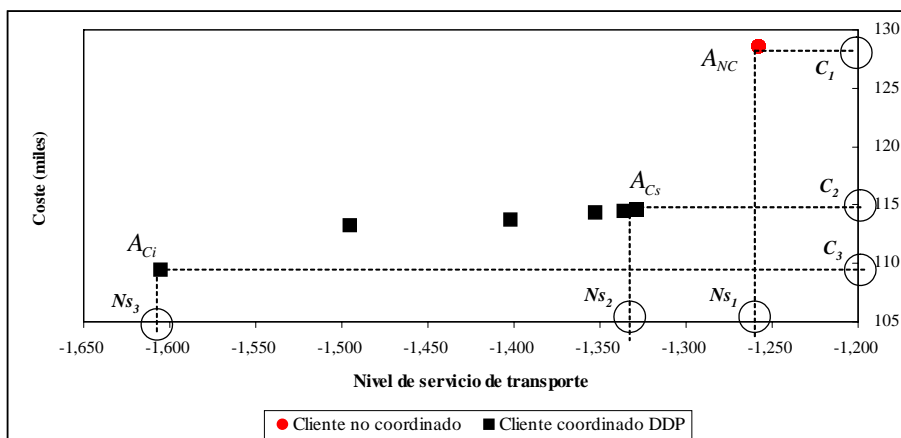


Figura 7.14
Frontera eficiente del cliente (Escenario 4)
(No coordinado con énfasis en el coste)

Por lo que respecta al proveedor, la figura 7.15 muestra la alternativa no coordinada basada en el coste como único criterio, representada por el punto A_{NC} ; asimismo, se presenta la curva que representa una muestra de las soluciones no dominadas en el contexto coordinado. Del mismo modo que en gráficas anteriores, la proyección de la alternativa no coordinada al punto A'_{NC} , permite identificar la zona en donde la coordinación es más rentable para el proveedor. En la figura, el segmento entre los puntos $A'_{NC}(C_1, Ns_3)$ y (C_2, Ns_2) contiene las alternativas no dominadas. En otras palabras, el punto A_{NC} es superior en coste e inferior en el nivel de servicio de transporte, lo cual significa que es dominado por el segmento antes indicado.

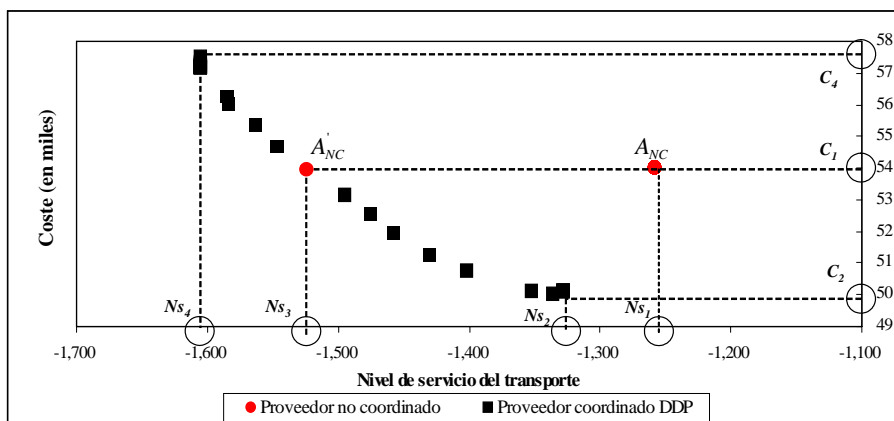


Figura 7.15
Frontera eficiente del proveedor (Escenario 4)
(No coordinado con énfasis en coste)

En conjunto (cliente-proveedor), el sistema es claramente dominado por la solución coordinada. En efecto, la opción no coordinada es completamente superada debido a que su coste es peor que un sistema coordinado, y el nivel de servicio de transporte no es el más deseable. En este sentido, se observa un mejor servicio en un sistema coordinado que considera ambos criterios (véase figura 7.16).

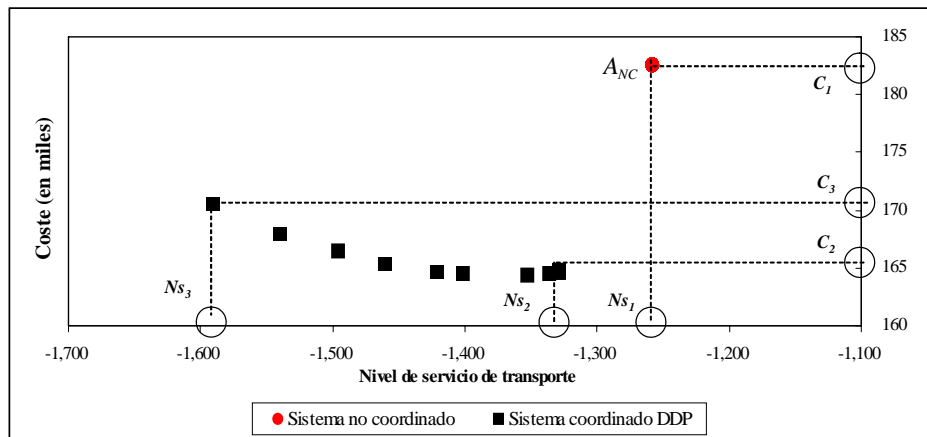


Figura 7.16
Frontera eficiente del sistema (Escenario 4)
(No coordinado con énfasis en coste)

7.4.6 Análisis operativo del modelo y frontera Pareto. Escenario 5

Escenario 5: Esquema no coordinado contra esquema coordinado teniendo en cuenta los criterios de coste y nivel de servicio del transporte en un ambiente de negociación DDP.

Para el caso en que un esquema no coordinado considere ambos criterios de solución, se observa que la frontera eficiente del cliente tiene un mayor alcance sobre el nivel de servicio del transporte, pero también el mayor coste. Por su parte, la curva que representa las soluciones coordinadas, permite ver que en el rango entre Ns_2 y Ns_4 sobre el nivel de servicio, es más preferible sobre una política no coordinada.

Es evidente que después de la cota superior Ns_4 , el cliente podrá tomar la decisión de no coordinarse para lograr un mejor nivel de servicio del transporte (véase figura 7.17) a costa de asumir mayores costes.

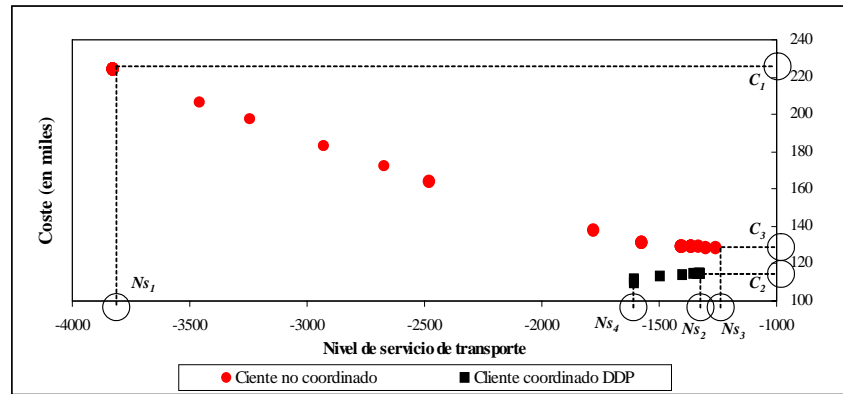


Figura 7.17
Frontera eficiente del cliente (Escenario 5)
(No coordinado considerando ambos criterios)

En la figura 7.18 se observa el desarrollo de las fronteras eficientes para el proveedor en el contexto no coordinado y coordinado, este último en un ambiente de negociación DDP. En dicha figura se observa que en un esquema no coordinado, el coste del proveedor se mantiene sobre una constante, aún cuando se incrementó el nivel de servicio del transporte. El motivo de esto último, básicamente se debe a que el coste de transporte es absorbido por el cliente y en nada influye en el proveedor. Sin embargo, en el contexto coordinado, ocurren dos situaciones encontradas: *i*) el nivel de servicio de transporte se encuentra acotando por el rango Ns_1 y Ns_3 , *ii*) el coste en que incurre el proveedor aumenta considerablemente en dicho rango, a raíz de los descuentos en el precio de los productos que asume el proveedor. De esta manera la intersección, indicada por $A_{NC} \approx A_C$, permite distinguir la cota superior que determina la conveniencia del proveedor por asumir la coordinación ECR, o asumir una política no coordinada.

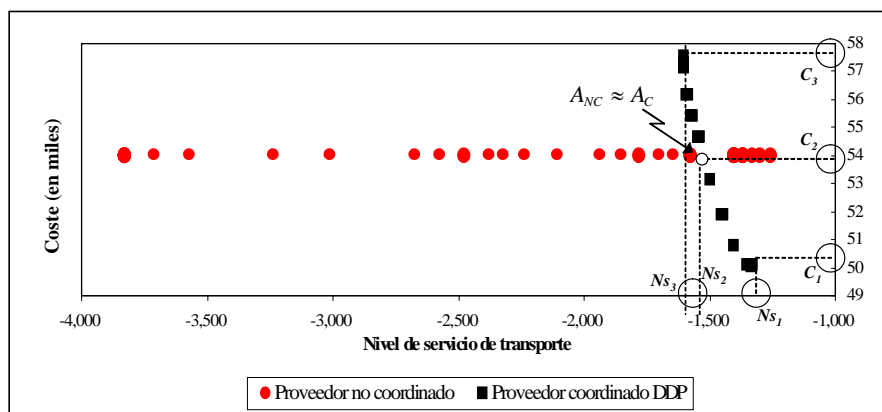


Figura 7.18
Frontera eficiente del proveedor (Escenario 5)
(No coordinado considerando ambos criterios)

Considerando el sistema en su conjunto (cliente y proveedor), en la figura 7.19 se observa que la coordinación es recomendable para el rango entre Ns_2 y Ns_4 del nivel de servicio de transporte. En dicha figura, se aprecia que los costes de la coordinación ECR son inferiores en dicho rango con respecto a la política no coordinada.

En cierta forma, el modelo acota la frontera eficiente del sistema coordinado de acuerdo a una mejor combinación de los modos de transporte, una mayor consolidación de productos y una mejor gestión de los inventarios; el resultado de lo anterior, se traduce en un rango muy pequeño entre los costes. En esta figura, es evidente también que después de la cota superior Ns_3 , se podría lograr un mejor nivel de servicio del transporte, sin embargo, el sistema tendría que asumir mayores costes y no coordinarse; si ese fuera el caso, el cliente y el proveedor deberán llevar cabo una evaluación detallada e individual para tomar decisiones conjuntas.

En referencia a la figuras 7.17 y 7.18 anteriores, se hace notar que dentro del rango $[Ns_2 - Ns_4]$ existen soluciones no dominadas que favorecen la coordinación para ambos actores en la cadena, y que corresponden a los mismos rangos del cliente y el proveedor, sobre el criterio del nivel de servicio de transporte.

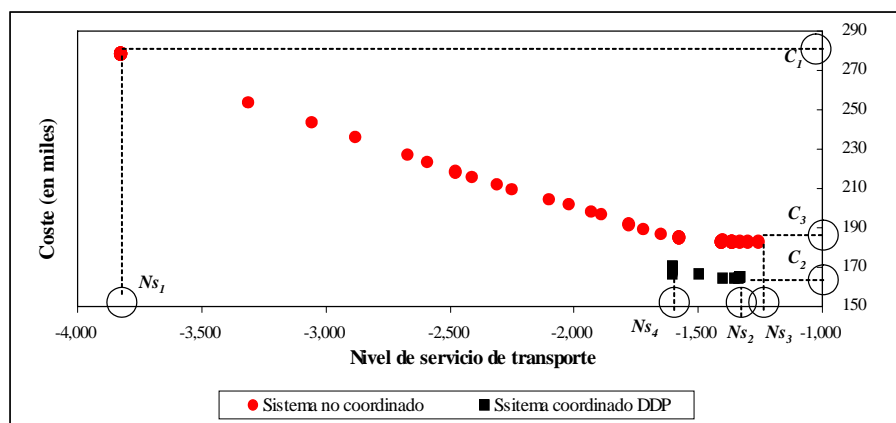


Figura 7.19
Frontera eficiente del sistema (Escenario 5)
(No coordinado considerando ambos criterios)

7.4.7 Análisis operativo del modelo y frontera Pareto. Escenario 6

Escenario 6: Esquema no coordinado basado en el nivel de servicio de transporte contra esquema coordinado teniendo en cuenta los criterios de coste y nivel de servicio del transporte en un ambiente de negociación DDP.

De acuerdo con los resultados del modelo en el contexto DDP, en la figura 7.20 se aprecia claramente que la coordinación de inventarios se presenta en un rango mucho menor, tanto en coste C_2 como en el nivel de servicio Ns_2 y Ns_3 , comparado con la alternativa no coordinada basada sólo en el nivel de servicio de transporte. Particularmente, la alternativa no coordinada, representada por el punto con coordenadas (C_1, Ns_1) , maximiza el nivel de servicio de transporte, pero no minimiza el coste. Por lo anterior, el cliente en este contexto, podría tomar la decisión de reducir su coste y cumplir con cierto nivel de servicio sin lograr proporcionar el máximo nivel de servicio. Esto último, debido a que corresponde al proveedor en la negociación DDP llevar a cabo la gestión del transporte.

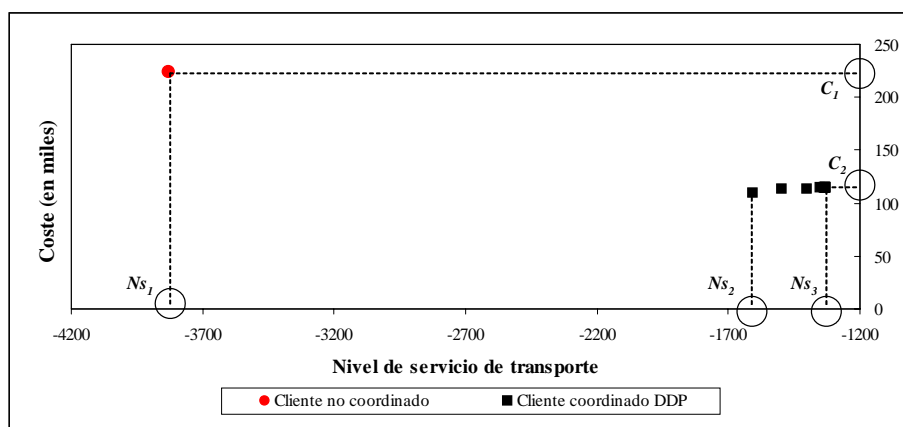


Figura 7.20
Frontera eficiente del cliente (Escenario 6)
(No coordinado con énfasis en el nivel de servicio de transporte)

En la figura 7.21 se observa el desarrollo de la frontera eficiente para el proveedor en el contexto coordinado, este último en un ambiente de negociación DDP. En dicha figura se observa que en un esquema no coordinado, basado únicamente en el nivel de servicio es posible optimizar este criterio, no así el coste, el cual, a partir de su proyección hacia la frontera eficiente para el caso coordinado, parece dividirla en dos porciones: la inferior, con soluciones no dominadas y la superior, con soluciones débilmente no dominadas.

El motivo de esto último, básicamente se debe a que el esquema no coordinado, no tiene en cuenta los costes de transporte que son absorbidos por el cliente y en nada afectan al proveedor. Sin embargo, como en el escenario 5, en el contexto coordinado ocurren dos situaciones encontradas: i) el nivel de servicio de transporte se encuentra

acotando por el rango Ns_2 y Ns_3 , el cual refleja claramente la importancia y su efecto en la negociación de las tarifas de transporte por parte del proveedor; *ii*) el coste en que incurre el proveedor se incrementa notablemente en dicho rango, a raíz de los descuentos en el precio de los productos que asume el proveedor.

De esta manera, la intersección indicada por $A_{NC} \approx A_C$, permite distinguir la cota superior que determina la conveniencia del proveedor por asumir la coordinación ECR o mantener la política no coordinada.

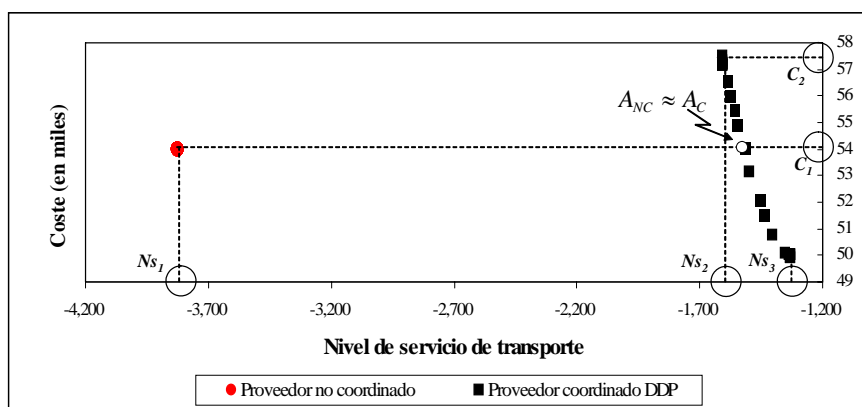


Figura 7.21
Frontera eficiente del proveedor (Escenario 6)
(No coordinado con énfasis en el nivel de servicio de transporte)

Dada la naturaleza del problema, para el sistema en su conjunto (cliente-proveedor) puede observarse que en el contexto DDP, la coordinación de inventarios se presenta en un rango mucho menor, tanto en coste C_2 como en el nivel de servicio Ns_2 y Ns_3 , comparado con la alternativa no coordinada basada sólo en el nivel de servicio de transporte (véase figura 7.22).

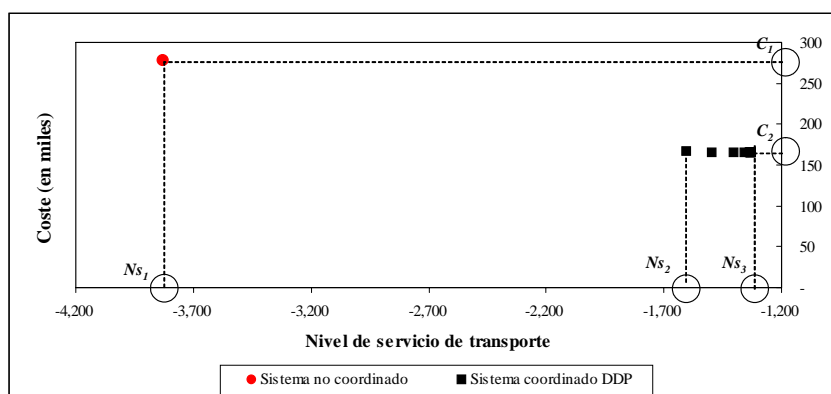


Figura 7.22
Frontera eficiente del sistema (Escenario 6)
(No coordinado con énfasis en el nivel de servicio de transporte)

Particularmente, la alternativa no coordinada, representada por el punto con coordenadas (C_1, Ns_1) , maximiza el nivel de servicio de transporte, pero no minimiza el coste. Por lo anterior, el sistema en este contexto, podría buscar la forma de reducir su coste y cumplir con cierto nivel de servicio sin alcanzar el máximo. Esto último, se debe a que corresponde al proveedor en la negociación DDP llevar a cabo la gestión del transporte. No obstante lo anterior, el modelo permite distinguir el segmento de soluciones que son benéficas para ambos eslabones en la cadena de abastecimiento.

7.5 Análisis de las soluciones no dominadas en torno a los beneficios logrados con la estrategia ECR

En este apartado se analizan de manera detalla los beneficios (o pérdidas) obtenidos con la instrumentación de la estrategia de coordinación ECR con respecto a la práctica no coordinada. Dichos análisis se llevan a cabo para cada uno de los diferentes escenarios establecidos en el contexto de los términos del comercio internacional ExW y DDP, bajo el concepto multicriterio.

7.5.1 Alternativas no dominadas. Escenario 1

Esta sección presenta los resultados que demuestran el efecto de la instrumentación de la estrategia ECR bajo el término de comercio internacional ExW, en el contexto del escenario 1 de análisis. Los resultados se presentan por separado para el cliente, proveedor y de manera conjunta (cliente-proveedor) desde el punto de vista de sistema. De esta manera, los incisos a continuación, resumen los resultados más relevantes.

- a. En general, la operatividad del modelo responde al planteamiento específico de la teoría de inventarios en un ambiente coordinado. Por ejemplo, los resultados en el cuadro 7.16, demuestran que el cliente puede lograr una reducción de sus costes fijos por ordenar; aumentar el coste de almacenamiento (inventarios); reducir el inventario en tránsito, y aumentar los del transporte en la medida que se hace uso de modos más eficientes (con preferencia al nivel de servicio).
- b. Debido a que el modelo tiene en cuenta el criterio del nivel de servicio de transporte, los resultados permiten observar que en la medida que se otorgue mayor preferencia al nivel de servicio, las tasas de descuento en el precio de los productos se

incrementan de manera diferente para cada uno (véase cuadro 7.17). En términos generales, dichas tasas oscilan entre 0.01% y 0.46%. (véase también la figura 7.23).

Cuadro 7.16
Costes del cliente coordinado en el contexto del Incoterm ExW
(Escenario 1: Soluciones no dominadas)

Dirección	Número de opciones	Ordenar	Inventario	Inventario en tránsito	Transporte	Total
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
↑ Preferencia al coste ↓ Preferencia al nivel de servicio del transporte	1	9,921	1,035	36,562	114,034	161,552
	2	9,921	1,050	36,365	114,872	162,208
	3	9,311	3,021	27,073	143,839	183,244
	4	9,011	4,257	26,844	146,091	186,204
	5	8,631	6,507	26,201	151,488	192,827
	6	8,331	8,486	25,833	155,113	197,763
	7	8,001	10,532	25,163	159,177	202,873
	8	7,341	16,033	23,735	169,291	216,399
	9	7,341	16,033	23,735	169,291	216,399
	10	7,341	16,033	23,245	170,483	217,102
	11	7,036	18,173	23,071	171,997	220,276
	12	6,766	19,587	22,329	174,385	223,067
	13	6,581	20,672	22,115	175,342	224,710
	14	6,581	20,672	22,115	175,342	224,710
	15	6,436	22,719	21,711	177,341	228,207
	16	6,021	35,584	19,174	190,653	251,431
	17	5,621	39,971	18,308	194,418	258,318
	18	5,221	45,385	17,241	199,063	266,909
	19	5,221	45,385	17,241	199,063	266,909
	20	5,221	45,385	17,241	199,063	266,909
	21	5,221	45,385	17,241	199,063	266,909
	22	5,221	45,385	17,241	199,063	266,909
	23	5,221	45,385	17,241	199,063	266,909
	24	5,221	45,385	17,241	199,063	266,909
	25	5,221	45,385	17,241	199,063	266,909
	26	5,126	46,317	17,241	199,063	267,746
	27	5,221	45,385	17,241	199,063	266,909
	28	5,221	45,385	17,241	199,063	266,909

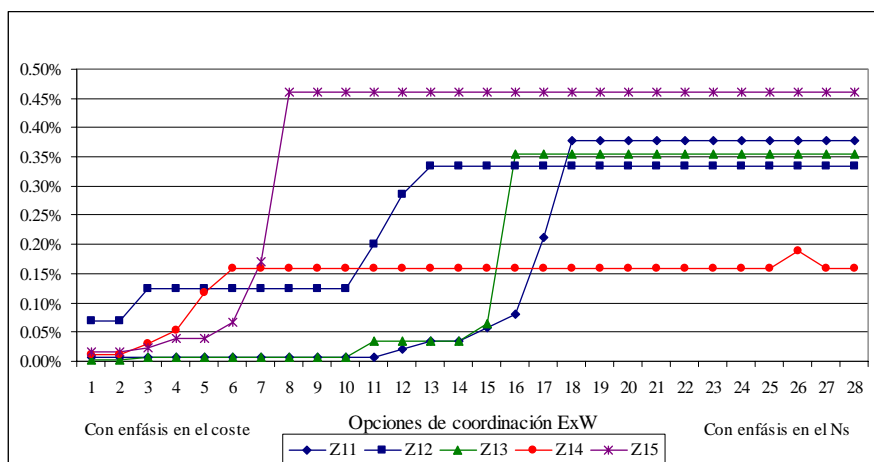


Figura 7.23
Tasa de descuento en el precio de los productos (Incoterm ExW)

Cuadro 7.17

Descuento total en el precio de los productos (Escenario 1: valor de las z_{ij})

Tasa de descuento						Coste total anual de compra de cada producto					Descuento total
						3,015,103	925,111	4,062,273	2,877,556	1,673,226	
						Descuento por producto y período					
	z_{11}	z_{12}	z_{13}	z_{14}	z_{15}	Producto 1	Producto 2	Producto 3	Producto 4	Producto 5	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
1	0.01%	0.07%	0.00%	0.01%	0.02%	241	638	110	308	264	1,561
2	0.01%	0.07%	0.00%	0.01%	0.02%	241	638	110	325	264	1,579
3	0.01%	0.12%	0.01%	0.03%	0.02%	241	1,145	301	858	392	2,936
4	0.01%	0.12%	0.01%	0.05%	0.04%	241	1,145	301	1,511	673	3,870
5	0.01%	0.12%	0.01%	0.12%	0.04%	241	1,145	301	3,381	673	5,741
6	0.01%	0.12%	0.01%	0.16%	0.07%	241	1,145	301	4,595	1,136	7,419
7	0.01%	0.12%	0.01%	0.16%	0.17%	241	1,145	301	4,595	2,853	9,135
8	0.01%	0.12%	0.01%	0.16%	0.46%	241	1,145	301	4,595	7,693	13,976
9	0.01%	0.12%	0.01%	0.16%	0.46%	241	1,145	301	4,595	7,693	13,976
10	0.01%	0.12%	0.01%	0.16%	0.46%	241	1,145	301	4,595	7,693	13,976
11	0.01%	0.20%	0.03%	0.16%	0.46%	241	1,865	1,418	4,595	7,693	15,813
12	0.02%	0.29%	0.03%	0.16%	0.46%	603	2,644	1,418	4,595	7,693	16,954
13	0.04%	0.33%	0.03%	0.16%	0.46%	1,064	3,083	1,418	4,595	7,693	17,854
14	0.04%	0.33%	0.03%	0.16%	0.46%	1,064	3,083	1,418	4,595	7,693	17,854
15	0.06%	0.33%	0.07%	0.16%	0.46%	1,725	3,083	2,657	4,595	7,693	19,754
16	0.08%	0.33%	0.36%	0.16%	0.46%	2,406	3,083	14,425	4,595	7,693	32,204
17	0.21%	0.33%	0.36%	0.16%	0.46%	6,389	3,083	14,425	4,595	7,693	36,186
18	0.38%	0.33%	0.36%	0.16%	0.46%	11,397	3,083	14,425	4,595	7,693	41,195
19	0.38%	0.33%	0.36%	0.16%	0.46%	11,397	3,083	14,425	4,595	7,693	41,195
20	0.38%	0.33%	0.36%	0.16%	0.46%	11,397	3,083	14,425	4,595	7,693	41,195
21	0.38%	0.33%	0.36%	0.16%	0.46%	11,397	3,083	14,425	4,595	7,693	41,195
22	0.38%	0.33%	0.36%	0.16%	0.46%	11,397	3,083	14,425	4,595	7,693	41,195
23	0.38%	0.33%	0.36%	0.16%	0.46%	11,397	3,083	14,425	4,595	7,693	41,195
24	0.38%	0.33%	0.36%	0.16%	0.46%	11,397	3,083	14,425	4,595	7,693	41,195
25	0.38%	0.33%	0.36%	0.16%	0.46%	11,397	3,083	14,425	4,595	7,693	41,195
26	0.38%	0.33%	0.36%	0.19%	0.46%	11,397	3,083	14,425	5,433	7,693	42,032
27	0.38%	0.33%	0.36%	0.16%	0.46%	11,397	3,083	14,425	4,595	7,693	41,195
28	0.38%	0.33%	0.36%	0.16%	0.46%	11,397	3,083	14,425	4,595	7,693	41,195

- c. A partir de las cifras en el cuadro 7.17, la suma de los descuentos puede alcanzar valores muy altos que hacen infactibles ciertas alternativas de coordinación cliente y proveedor, tal como se corrobora más adelante.
- d. La comparación entre los costes en los que incurre el cliente en un ambiente no coordinado (haciendo uso sólo del servicio de transporte más “barato”) con respecto al coste coordinado, utilizando la negociación ExW y diferentes modos de transporte, resulta en una pérdida. Como puede observarse en el cuadro 7.18, la diferencia se incrementa en la medida que se otorga mayor preferencia al nivel de servicio (véase también figura 7.24).

Cuadro 7.18

Ahorros o pérdidas del cliente en el contexto del Incoterm ExW (Escenario 1)

Coste del cliente no coordinado		Costes del cliente coordinado				Descuento en el precio del producto	Total	Diferencia	Ahorros o pérdidas
		Ordenar	Inventario	Inventario en tránsito	Transporte				
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
1	128,546	9,921	1,035	36,562	114,034	1,561	159,990	- 31,444	-24.5%
2	128,546	9,921	1,050	36,365	114,872	1,579	160,629	- 32,083	-25.0%
3	128,546	9,311	3,021	27,073	143,839	2,936	180,308	- 51,761	-40.3%
4	128,546	9,011	4,257	26,844	146,091	3,870	182,334	- 53,787	-41.8%
5	128,546	8,631	6,507	26,201	151,488	5,741	187,086	- 58,539	-45.5%
6	128,546	8,331	8,486	25,833	155,113	7,419	190,344	- 61,797	-48.1%
7	128,546	8,001	10,532	25,163	159,177	9,135	193,738	- 65,191	-50.7%
8	128,546	7,341	16,033	23,735	169,291	13,976	202,423	- 73,876	-57.5%
9	128,546	7,341	16,033	23,735	169,291	13,976	202,423	- 73,876	-57.5%
10	128,546	7,341	16,033	23,245	170,483	13,976	203,126	- 74,579	-58.0%
11	128,546	7,036	18,173	23,071	171,997	15,813	204,463	- 75,917	-59.1%
12	128,546	6,766	19,587	22,329	174,385	16,954	206,113	- 77,567	-60.3%
13	128,546	6,581	20,672	22,115	175,342	17,854	206,856	- 78,309	-60.9%
14	128,546	6,581	20,672	22,115	175,342	17,854	206,856	- 78,309	-60.9%
15	128,546	6,436	22,719	21,711	177,341	19,754	208,453	- 79,906	-62.2%
16	128,546	6,021	35,584	19,174	190,653	32,204	219,227	- 90,681	-70.5%
17	128,546	5,621	39,971	18,308	194,418	36,186	222,132	- 93,585	-72.8%
18	128,546	5,221	45,385	17,241	199,063	41,195	225,714	- 97,168	-75.6%
19	128,546	5,221	45,385	17,241	199,063	41,195	225,714	- 97,168	-75.6%
20	128,546	5,221	45,385	17,241	199,063	41,195	225,714	- 97,168	-75.6%
21	128,546	5,221	45,385	17,241	199,063	41,195	225,714	- 97,168	-75.6%
22	128,546	5,221	45,385	17,241	199,063	41,195	225,714	- 97,168	-75.6%
23	128,546	5,221	45,385	17,241	199,063	41,195	225,714	- 97,168	-75.6%
24	128,546	5,221	45,385	17,241	199,063	41,195	225,714	- 97,168	-75.6%
25	128,546	5,221	45,385	17,241	199,063	41,195	225,714	- 97,168	-75.6%
26	128,546	5,221	45,385	17,241	199,063	41,195	225,714	- 97,168	-75.6%
27	128,546	5,221	45,385	17,241	199,063	41,195	225,714	- 97,168	-75.6%
28	128,546	5,221	45,385	17,241	199,063	41,195	225,714	- 97,168	-75.6%

e. Por otro lado, en el cuadro 7.18 también se aprecia cómo a partir de un aumento en el coste de almacenamiento del cliente (columna 4), derivado de aceptar la estrategia ECR, la compensación otorgada por el proveedor al cliente, se incrementa paralelamente (columna 7). De igual modo que en los cuadros anteriores, el número ascendente de la opción indica una mayor preferencia al nivel de servicio del transporte y a la inversa, se indica la preferencia al coste.

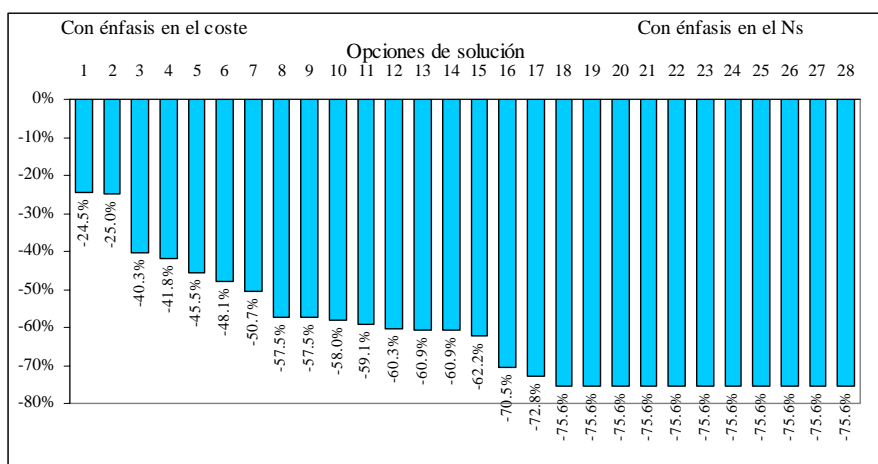


Figura 7.24
Pérdidas del cliente en el contexto del Incoterm ExW (Escenario 1)

f. Para el proveedor, los costes fijos se reducen por la acción de la coordinación misma, la cual produce un aumento en los costes de descuento que debe otorgar al cliente por aceptar la estrategia ECR, combinando los tres modos de transporte considerados (véase cuadro 7.19). Esta combinación permite corroborar que los costes totales del proveedor con respecto al nivel de servicio de transporte no crecen proporcionalmente (véase figura 7.25).

Cuadro 7.19
Costes del proveedor coordinado en el contexto del Incoterm ExW (Escenario 1)

Dirección	Número de opciones	Coste fijo	Descuento en el precio de los productos	Total	Nivel de servicio de transporte
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Preferencia al coste →	1	25,600	1,561	27,161	-2,226,740
	2	25,600	1,579	27,179	-2,242,517
	3	29,350	2,936	32,286	-2,768,514
	4	29,050	3,870	32,920	-2,811,809
	5	29,000	5,741	34,741	-2,914,812
	6	28,700	7,419	36,119	-2,984,485
	7	28,750	9,135	37,885	-3,062,017
	8	28,850	13,976	42,826	-3,255,402
	9	28,850	13,976	42,826	-3,255,402
	10	29,550	13,976	43,526	-3,277,481
	11	28,700	15,813	44,513	-3,307,005
	12	29,100	16,954	46,054	-3,352,112
	13	28,900	17,854	46,754	-3,370,511
	14	28,900	17,854	46,754	-3,370,511
	15	28,700	19,754	48,454	-3,408,923
	16	27,900	32,204	60,104	-3,664,811
	17	27,500	36,186	63,686	-3,737,187
	18	27,100	41,195	68,295	-3,826,480
	19	27,100	41,195	68,295	-3,826,480
	20	27,100	41,195	68,295	-3,826,480
	21	27,100	41,195	68,295	-3,826,480
	22	27,100	41,195	68,295	-3,826,480
	23	27,100	41,195	68,295	-3,826,480
	24	27,100	41,195	68,295	-3,826,480
	25	27,100	41,195	68,295	-3,826,480
	26	26,650	42,032	68,682	-3,826,480
	27	27,100	41,195	68,295	-3,826,480
	28	27,100	41,195	68,295	-3,826,480

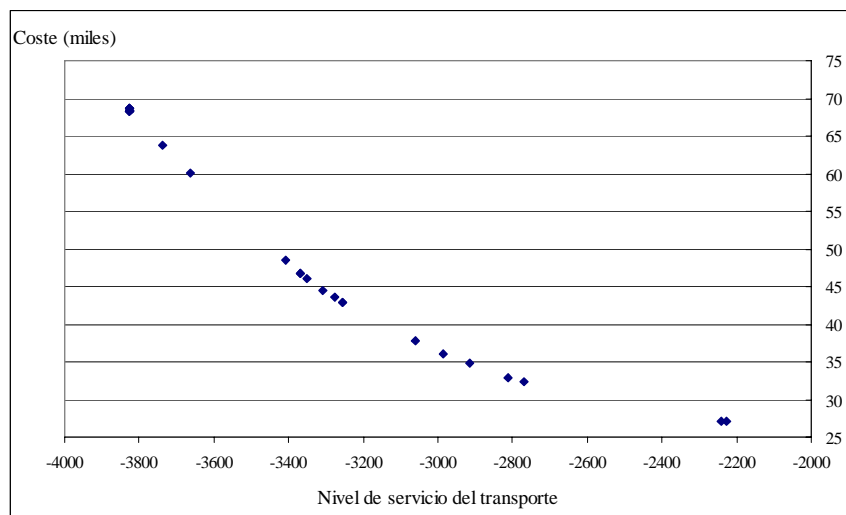


Figura 7.25
Soluciones no dominadas del proveedor coordinado en el contexto del *Incoterm ExW*

g. En un ambiente coordinado, los costes del proveedor muestran ahorros sustanciales cuando se otorga mayor preferencia al coste (columna 3); en la medida que se cambia la preferencia al nivel de servicio del transporte, la situación comienza a revertirse provocándole cierto nivel de pérdidas (columna 8); sobre todo, cuando el coste de descuento en el precio de los productos es superior a su coste fijo (véase figura 7.26 y cuadro 7.20, fila 16).

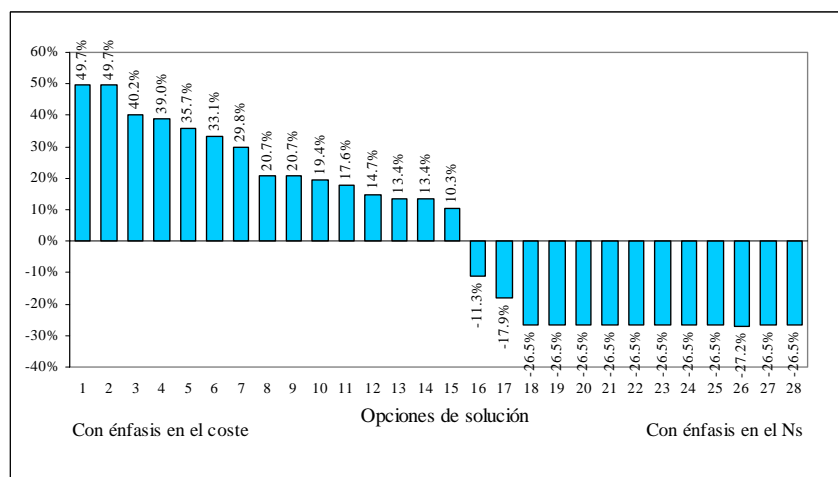


Figura 7.26
Ahorros o pérdidas del proveedor en el contexto del *Incoterm ExW* (Escenario 1)

Cuadro 7.20
Ahorros o pérdidas del proveedor en el contexto del Incoterm ExW (Escenario 1)

Dirección	Coste fijo del proveedor no coordinado		Coordinado			Diferencia	Ahorros o pérdidas
			Coste fijo	Descuento en el precio de los productos	Coste total		
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
↑ Preferencia al coste ↓ Preferencia al nivel de servicio de transporte	1	54,000	25,600	1,561	27,172	26,828	49.7%
	2	54,000	25,600	1,579	27,179	26,821	49.7%
	3	54,000	29,350	2,936	32,286	21,714	40.2%
	4	54,000	29,050	3,870	32,920	21,080	39.0%
	5	54,000	29,000	5,741	34,741	19,259	35.7%
	6	54,000	28,700	7,419	36,119	17,881	33.1%
	7	54,000	28,750	9,135	37,885	16,115	29.8%
	8	54,000	28,850	13,976	42,826	11,174	20.7%
	9	54,000	28,850	13,976	42,826	11,174	20.7%
	10	54,000	29,550	13,976	43,526	10,474	19.4%
	11	54,000	28,700	15,813	44,513	9,487	17.6%
	12	54,000	29,100	16,954	46,054	7,946	14.7%
	13	54,000	28,900	17,854	46,754	7,246	13.4%
	14	54,000	28,900	17,854	46,754	7,246	13.4%
	15	54,000	28,700	19,754	48,454	5,546	10.3%
	16	54,000	27,900	32,204	60,104	- 6,104	-11.3%
	17	54,000	27,500	36,186	63,686	- 9,686	-17.9%
	18	54,000	27,100	41,195	68,295	-14,295	-26.5%
	19	54,000	27,100	41,195	68,295	-14,295	-26.5%
	20	54,000	27,100	41,195	68,295	-14,295	-26.5%
	21	54,000	27,100	41,195	68,295	-14,295	-26.5%
	22	54,000	27,100	41,195	68,295	-14,295	-26.5%
	23	54,000	27,100	41,195	68,295	-14,295	-26.5%
	24	54,000	27,100	41,195	68,295	-14,295	-26.5%
	25	54,000	27,100	41,195	68,295	-14,295	-26.5%
	26	54,000	27,100	41,195	68,295	-14,295	-26.5%
	27	54,000	27,100	41,195	68,295	-14,295	-26.5%
	28	54,000	27,100	41,195	68,295	-14,295	-26.5%

h. Por lo que se refiere al coste total del sistema (cliente-proveedor), se observan pérdidas en la totalidad de las soluciones coordinadas. Esto se debe a que los resultados negativos obtenidos por el cliente son muy superiores a los ahorros del proveedor (véase figuras 7.27 y 7.28 y cuadro 7.21).

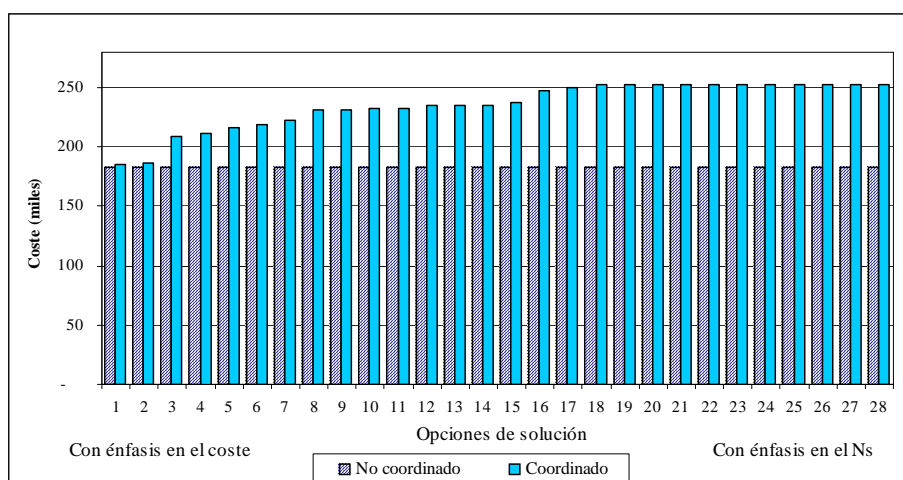


Figura 7.27
Coste total del sistema en el contexto del Incoterm ExW (Escenario 1)

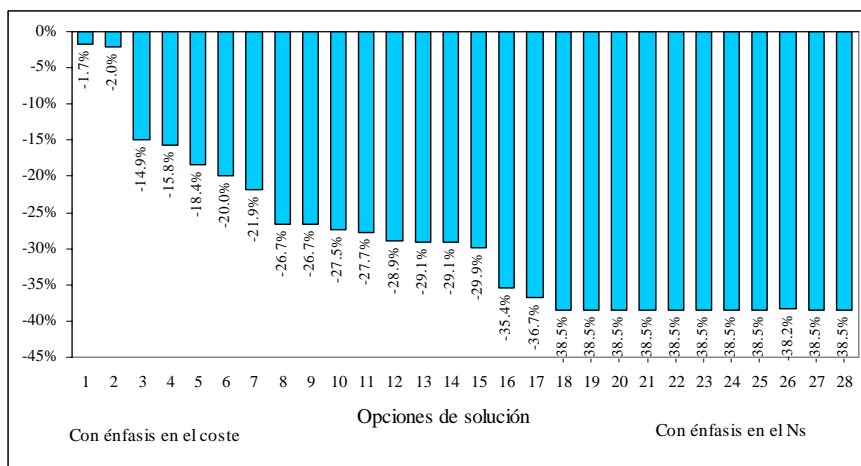


Figura 7.28

Ahorros o pérdidas del sistema en el contexto del *Incoterm ExW* (Escenario 1)

Cuadro 7.22

Ahorros y pérdidas del sistema y nivel de servicio del transporte en el contexto del *Incoterm ExW* (Escenario 1)

Dirección	Sol.	Coste total del sistema			Nivel de servicio del transporte			
		No coordinado	Coordinado	Ahorros o pérdidas	Nivel de servicio del transporte no coordinado	Nivel de servicio del transporte coordinado	Índice de servicio no coordinado	Índice de servicio coordinado
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
↑ Preferencia al coste ↓ Preferencia al nivel de servicio de transporte	1	182,547	185,590	-1.7%	-1,257,881	- 2,226,740	6.9	12.0
	2	182,547	186,229	-2.0%	-1,257,881	- 2,242,517	6.9	12.0
	3	182,547	209,658	-14.9%	-1,257,881	- 2,768,514	6.9	13.2
	4	182,547	211,384	-15.8%	-1,257,881	-2,811,809	6.9	13.3
	5	182,547	216,086	-18.4%	-1,257,881	-2,914,812	6.9	13.5
	6	182,547	219,044	-20.0%	-1,257,881	- 2,984,485	6.9	13.6
	7	182,547	222,488	-21.9%	-1,257,881	- 3,062,017	6.9	13.8
	8	182,547	231,273	-26.7%	-1,257,881	- 3,255,402	6.9	14.1
	9	182,547	231,273	-26.7%	-1,257,881	- 3,255,402	6.9	14.1
	10	182,547	232,676	-27.5%	-1,257,881	- 3,277,481	6.9	14.1
	11	182,547	233,163	-27.7%	-1,257,881	- 3,307,005	6.9	14.2
	12	182,547	235,213	-28.9%	-1,257,881	-3,352,112	6.9	14.3
	13	182,547	235,756	-29.1%	-1,257,881	-3,370,511	6.9	14.3
	14	182,547	235,756	-29.1%	-1,257,881	-3,370,511	6.9	14.3
	15	182,547	237,153	-29.9%	-1,257,881	- 3,408,923	6.9	14.4
	16	182,547	247,127	-35.4%	-1,257,881	-3,664,811	6.9	14.8
	17	182,547	249,632	-36.7%	-1,257,881	- 3,737,187	6.9	15.0
	18	182,547	252,814	-38.5%	-1,257,881	- 3,826,480	6.9	15.1
	19	182,547	252,814	-38.5%	-1,257,881	- 3,826,480	6.9	15.1
	20	182,547	252,814	-38.5%	-1,257,881	- 3,826,480	6.9	15.1
	21	182,547	252,814	-38.5%	-1,257,881	- 3,826,480	6.9	15.1
	22	182,547	252,814	-38.5%	-1,257,881	- 3,826,480	6.9	15.1
	23	182,547	252,814	-38.5%	-1,257,881	- 3,826,480	6.9	15.1
	24	182,547	252,814	-38.5%	-1,257,881	- 3,826,480	6.9	15.1
	25	182,547	252,814	-38.5%	-1,257,881	- 3,826,480	6.9	15.1
	26	182,547	252,814	-38.5%	-1,257,881	- 3,826,480	6.9	15.2
	27	182,547	252,814	-38.5%	-1,257,881	- 3,826,480	6.9	15.1
	28	182,547	252,814	-38.5%	-1,257,881	- 3,826,480	6.9	15.1

- i. No obstante lo anterior, la coordinación exhibe un índice de nivel de servicio del transporte aproximadamente de 2 a 1 con relación a la política no coordinada (véase figuras 7.29 y 7.30); ello implica que el uso combinado de modos de transporte alcanzará mejores niveles de servicio en un ambiente coordinado, que el no coordinado que utiliza el modo basado en el menor coste (o modo más lento).

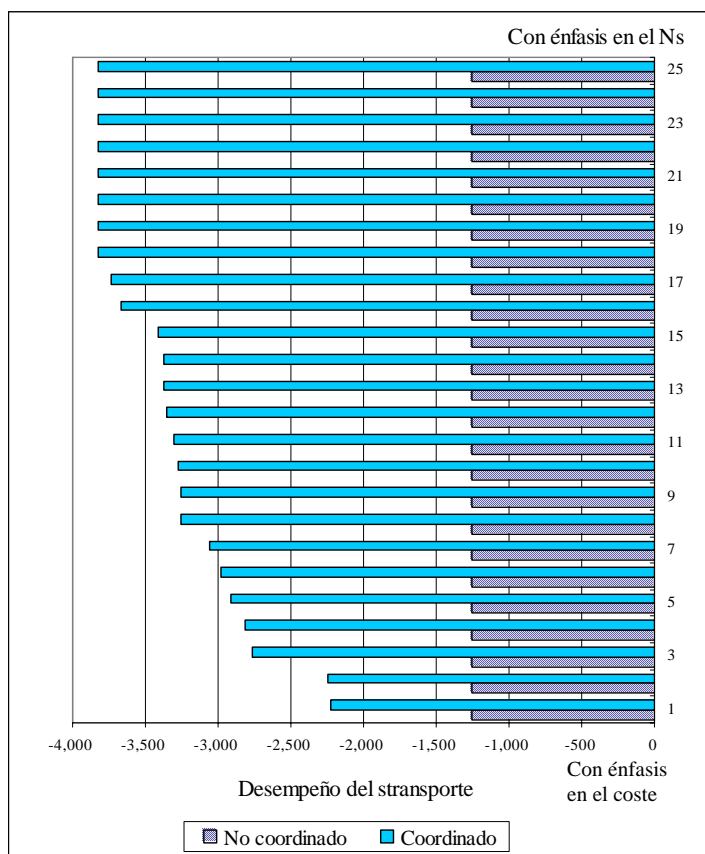


Figura 7.29

Nivel de servicio del transporte en el contexto del *Incoterm ExW* (Escenario 1)

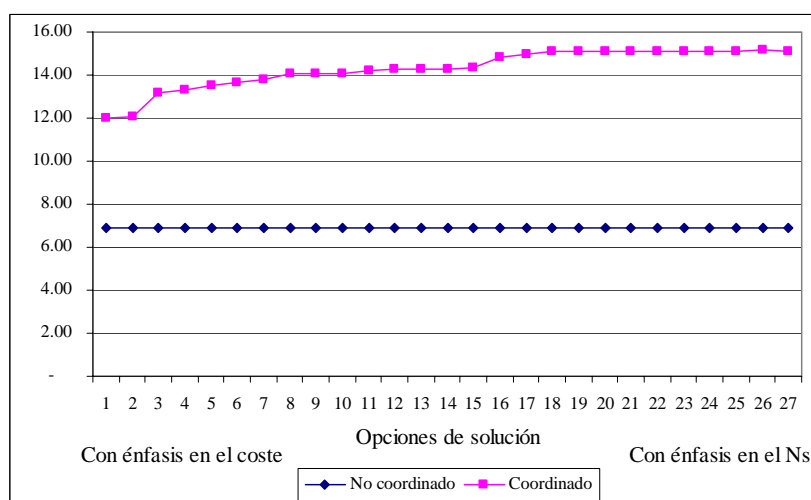


Figura 7.30

Índice de nivel de servicio del transporte con relación al coste (Escenario 1)

j. Por lo que se refiere a las estructuras de costes del cliente y del proveedor, en un ambiente coordinado, se observa para el primero que el transporte es su principal componente, mostrándose el intercambio entre los costes de inventario en tránsito y de almacenamiento en la medida que el criterio cambió de coste a nivel de servicio (véase figura 7.31). Por su parte, la estructura de costes del proveedor muestra el intercambio que existe entre sus costes fijos y el descuento (que asume como un coste) otorgado al cliente a partir de que éste acepta la coordinación ECR (véase figura 7.32).

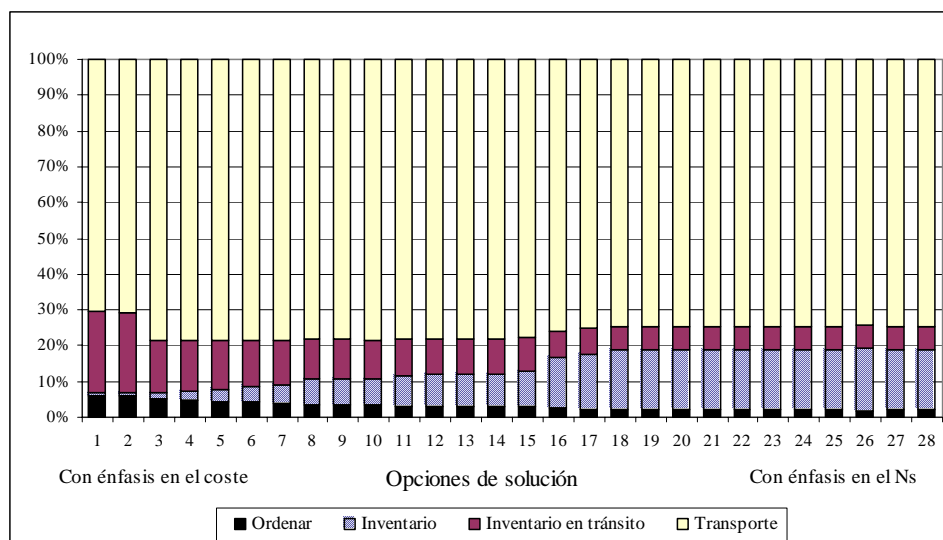


Figura 7.31
Estructura de costes del cliente coordinado (Escenario 1)

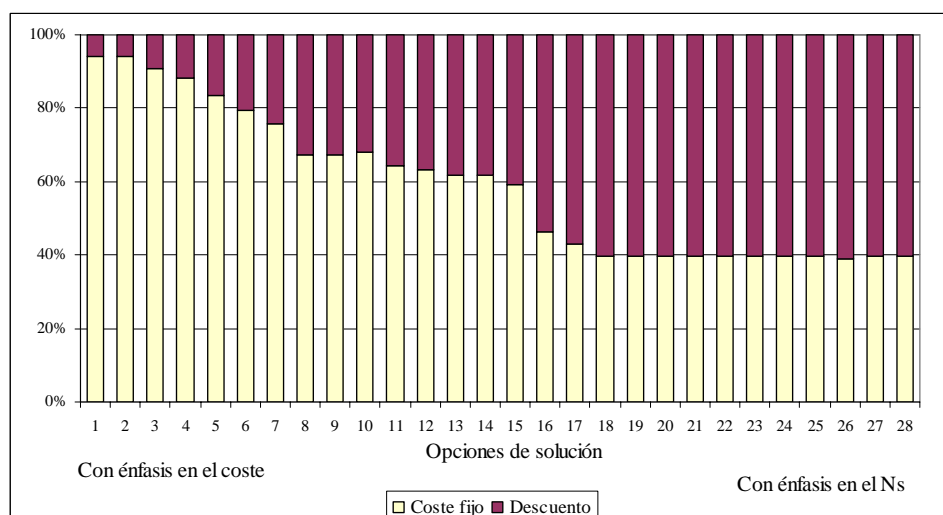


Figura 7.32
Estructura de costes del proveedor coordinado (Escenario 1)

7.5.2 Alternativas no dominadas. Escenario 2

Esta sección presenta los resultados que demuestran el efecto de la instrumentación de la estrategia ECR específicamente bajo el término de comercio internacional ExW, en el contexto del escenario 2 de análisis. Los resultados, se presentan por separado para el cliente, proveedor y de manera conjunta (cliente-proveedor) desde el punto de vista de sistema. De esta manera, los incisos a continuación, resumen los resultados más relevantes.

- a. De acuerdo con la figura 7.33 y el cuadro 7.22, la comparación de la posición no coordinada del cliente contra una perspectiva coordinada de éste, se observa que en la medida que se otorga mayor importancia al criterio del nivel de servicio del transporte, las pérdidas pueden llegar a ser menores, e incluso alcanzar ciertos ahorros. Cabe señalar, que el cambio súbito que se presenta entre las opciones 17 y 18 (tanto en la figura como en el cuadro), se debe a que el método de los pesos ponderados no encuentra todas las posibles soluciones en ciertos intervalos, por el motivo ya mencionado en el capítulo 6.

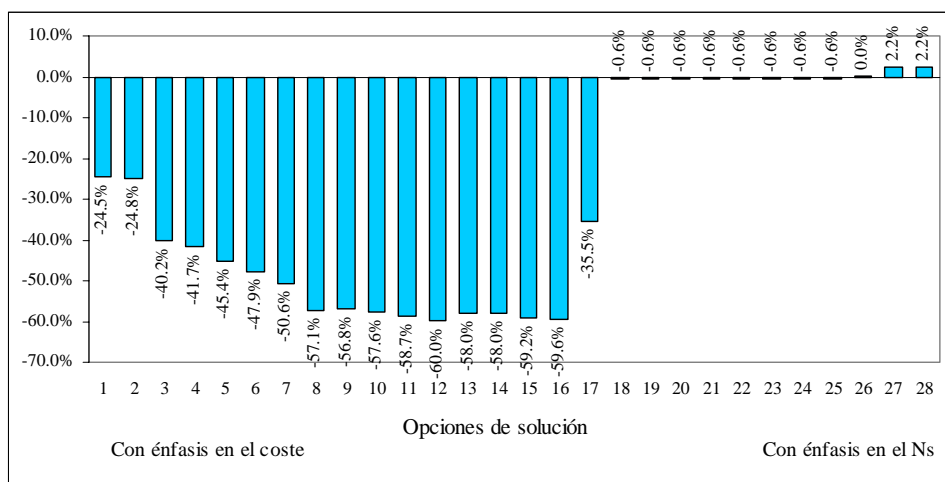


Figura 7.33
Pérdidas del cliente en el contexto del Incoterm ExW (Escenario 2)

- b. En términos generales, los resultados refleja con claridad la política coordinada ya que se observa también en el cuadro 7.22, que el incremento en el coste de inventario se ve compensado por un descuento en el precio de los productos casi al mismo nivel.

Cuadro 7.22
Ahorros o pérdidas del cliente en el contexto del Incoterm ExW (Escenario 2)

Costes del cliente no coordinado						Costes del cliente coordinado				Descuento	Total	Diferencia	Ahorros y pérdidas
	Ordenar	Inventario	Inventario en tránsito	Transporte	Total	Ordenar	Inventario	Inventario en tránsito	Transporte				
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)
1	10,441	-	57,448	60,657	128,547	9,921	1,035	36,562	114,034	1,561	159,990	- 31,444	-24.5%
2	10,441	-	53,251	64,970	128,663	9,921	1,050	36,365	114,872	1,579	160,629	- 31,967	-24.8%
3	10,441	-	54,902	63,247	128,590	9,311	3,021	27,073	143,839	2,936	180,308	- 51,717	-40.2%
4	10,441	-	51,151	67,083	128,675	9,011	4,257	26,844	146,091	3,870	182,334	-53,658	-41.7%
5	10,441	-	51,151	67,083	128,675	8,631	6,507	26,201	151,488	5,741	187,086	- 58,410	-45.4%
6	10,441	-	51,151	67,083	128,675	8,331	8,486	25,833	155,113	7,419	190,344	- 61,669	-47.9%
7	10,441	-	51,151	67,083	128,675	8,001	10,532	25,163	159,177	9,135	193,738	-65,062	-50.6%
8	10,441	-	49,004	69,407	128,852	7,341	16,033	23,735	169,291	13,976	202,423	-73,572	-57.1%
9	10,441	-	49,512	69,112	129,065	7,341	16,033	23,735	169,291	13,976	202,423	-73,358	-56.8%
10	10,441	-	49,004	69,407	128,852	7,341	16,033	23,245	170,483	13,976	203,126	-74,274	-57.6%
11	10,441	-	49,004	69,407	128,852	7,036	18,173	23,071	171,997	15,813	204,463	- 75,612	-58.7%
12	10,441	-	49,004	69,407	128,852	6,766	19,587	22,329	174,385	16,954	206,113	-77,262	-60.0%
13	10,441	-	40,705	79,753	130,899	6,581	20,672	22,115	175,342	17,854	206,856	-75,957	-58.0%
14	10,441	-	40,705	79,753	130,899	6,581	20,672	22,115	175,342	17,854	206,856	-75,957	-58.0%
15	10,441	-	40,705	79,753	130,899	6,436	22,719	21,711	177,341	19,754	208,453	-77,554	-59.2%
16	10,441	-	36,032	90,892	137,365	6,021	35,584	19,174	190,653	32,204	219,227	- 81,862	-59.6%
17	10,441	-	24,642	128,851	163,934	5,621	39,971	18,308	194,418	36,186	222,132	- 58,198	-35.5%
18	10,441	-	14,821	199,063	224,325	5,221	45,385	17,241	199,063	41,195	225,714	- 1,389	-0.6%
19	10,441	-	14,821	199,063	224,325	5,221	45,385	17,241	199,063	41,195	225,714	- 1,389	-0.6%
20	10,441	-	14,821	199,063	224,325	5,221	45,385	17,241	199,063	41,195	225,714	- 1,389	-0.6%
21	10,441	-	14,821	199,063	224,325	5,221	45,385	17,241	199,063	41,195	225,714	- 1,389	-0.6%
22	10,441	-	14,821	199,063	224,325	5,221	45,385	17,241	199,063	41,195	225,714	- 1,389	-0.6%
23	10,441	-	14,821	199,063	224,325	5,221	45,385	17,241	199,063	41,195	225,714	- 1,389	-0.6%
24	10,441	-	14,821	199,063	224,325	5,221	45,385	17,241	199,063	41,195	225,714	- 1,389	-0.6%
25	10,441	-	14,821	199,063	224,325	5,221	45,385	17,241	199,063	41,195	225,714	- 1,389	-0.6%
26	10,156	1,850	14,728	199,063	225,798	5,126	46,317	17,241	199,063	42,032	225,714	84	0.0%
27	9,406	8,004	14,334	199,063	230,807	5,221	45,385	17,241	199,063	41,195	225,714	5,093	2.2%
28	9,406	8,004	14,334	199,063	230,807	5,126	46,317	17,241	199,063	42,032	225,714	5,093	2.2%

c. Lo anterior se debe principalmente al cambio que experimenta la estructura de costes del cliente. Por ejemplo, en una política coordinada los costes de transporte representan un poco más del 70% y muestran incrementos parciales en la medida que se prefiere el criterio de nivel de servicio de transporte en comparación a la política no coordinada (48%), que presenta cambios sustanciales hasta llegar a representar el 86%. Por su parte, la participación de los costes de inventario en tránsito en un ambiente no coordinado representa el doble (44%) de la política coordinada (22%), cuando el criterio que prevalece es el coste, siendo muy similares para ambas políticas. Esto dos aspectos, reflejan el uso en que se combinan los modos de transporte (véase cuadros 7.23 y 7.24).

Cuadro 7.23
Estructura de costes del cliente no coordinado (Escenario 2)

Dirección	Sol.	Ordenar	Inventario	Inventario en tránsito	Transporte	Total	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	
↑ Preferencia al coste	↑ Preferencia al coste	1	8.1%	0.0%	44.7%	47.2%	100.0%
		2	8.1%	0.0%	41.4%	50.5%	100.0%
		3	8.1%	0.0%	42.7%	49.2%	100.0%
		4	8.1%	0.0%	39.8%	52.1%	100.0%
		5	8.1%	0.0%	39.8%	52.1%	100.0%
		6	8.1%	0.0%	39.8%	52.1%	100.0%
		7	8.1%	0.0%	39.8%	52.1%	100.0%
		8	8.1%	0.0%	38.0%	53.9%	100.0%
		9	8.1%	0.0%	38.4%	53.5%	100.0%
		10	8.1%	0.0%	38.0%	53.9%	100.0%
		11	8.1%	0.0%	38.0%	53.9%	100.0%
		12	8.1%	0.0%	38.0%	53.9%	100.0%
		13	8.0%	0.0%	31.1%	60.9%	100.0%
		14	8.0%	0.0%	31.1%	60.9%	100.0%
		15	8.0%	0.0%	31.1%	60.9%	100.0%
		16	7.6%	0.0%	26.2%	66.2%	100.0%
		17	6.4%	0.0%	15.0%	78.6%	100.0%
		18	4.7%	0.0%	6.6%	88.7%	100.0%
		19	4.7%	0.0%	6.6%	88.7%	100.0%
		20	4.7%	0.0%	6.6%	88.7%	100.0%
		21	4.7%	0.0%	6.6%	88.7%	100.0%
		22	4.7%	0.0%	6.6%	88.7%	100.0%
		23	4.7%	0.0%	6.6%	88.7%	100.0%
		24	4.7%	0.0%	6.6%	88.7%	100.0%
		25	4.7%	0.0%	6.6%	88.7%	100.0%
		26	4.5%	0.8%	6.5%	88.2%	100.0%
		27	4.1%	3.5%	6.2%	86.2%	100.0%
		28	4.1%	3.5%	6.2%	86.2%	100.0%

Cuadro 7.24
Estructura de costes del cliente coordinado en el contexto del Incoterm ExW (Escenario 2)

Dirección	Sol.	Ordenar	Inventario	Inventario en tránsito	Transporte	Total
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Preferencia al coste ↑ ↓ Preferencia al nivel de servicio de transporte	1	6.1%	0.6%	22.6%	70.6%	100.0%
	2	6.1%	0.6%	22.4%	70.8%	100.0%
	3	5.1%	1.6%	14.8%	78.5%	100.0%
	4	4.8%	2.3%	14.4%	78.5%	100.0%
	5	4.5%	3.4%	13.6%	78.6%	100.0%
	6	4.2%	4.3%	13.1%	78.4%	100.0%
	7	3.9%	5.2%	12.4%	78.5%	100.0%
	8	3.4%	7.4%	11.0%	78.2%	100.0%
	9	3.4%	7.4%	11.0%	78.2%	100.0%
	10	3.4%	7.4%	10.7%	78.5%	100.0%
	11	3.2%	8.2%	10.5%	78.1%	100.0%
	12	3.0%	8.8%	10.0%	78.2%	100.0%
	13	2.9%	9.2%	9.8%	78.0%	100.0%
	14	2.9%	9.2%	9.8%	78.0%	100.0%
	15	2.8%	10.0%	9.5%	77.7%	100.0%
	16	2.4%	14.2%	7.6%	75.8%	100.0%
	17	2.2%	15.5%	7.1%	75.3%	100.0%
	18	2.0%	17.0%	6.5%	74.6%	100.0%
	19	2.0%	17.0%	6.5%	74.6%	100.0%
	20	2.0%	17.0%	6.5%	74.6%	100.0%
	21	2.0%	17.0%	6.5%	74.6%	100.0%
	22	2.0%	17.0%	6.5%	74.6%	100.0%
	23	2.0%	17.0%	6.5%	74.6%	100.0%
	24	2.0%	17.0%	6.5%	74.6%	100.0%
	25	2.0%	17.0%	6.5%	74.6%	100.0%
	26	1.9%	17.3%	6.4%	74.3%	100.0%
	27	1.9%	17.3%	6.4%	74.3%	100.0%
	28	1.9%	17.3%	6.4%	74.3%	100.0%

- d. Por lo que respecta al proveedor, ya se dijo que en un ambiente no coordinado, sus costes fijos por atender los pedidos del cliente casi permanecen constantes. Bajo una política coordinada, se comprueba que sus costes fijos se reducen sustancialmente resultándole benéfico hasta en un 48% (ahorros) en las opciones donde le otorga mayor importancia a los costes; o como ya se ha venido mencionando, hasta que el descuento en el precio de los productos supere sus costes fijos (véase cuadro 7.25 y figura 7.34). Debido a que esta situación es la contraparte que se presenta con el cliente, puede establecerse que no sólo el tamaño del lote constituye un conflicto de intereses, sino también el nivel de servicio del transporte. Para ser más específico, el cliente le convendrá la coordinación de inventarios con énfasis en un mejor servicio de transporte; contrariamente, el proveedor aceptará una política de coordinación en la medida que un mejor servicio de transporte no le provoque que el descuento otorgado al cliente supere sus costes fijos.

Cuadro 7.25
Ahorros o pérdidas del proveedor en el contexto del Incoterm ExW (Escenario 2)

Dirección	Sol.	Coste fijo no coordinado	Coste fijo	Descuento en el precio del producto	Total	Diferencia	Ahorros o pérdidas
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
↑ Preferencia al coste ↓ Preferencia al nivel de servicio de transporte	1	54,000	25,600	1,561	27,161	26,839	53.6%
	2	54,000	25,600	1,579	27,179	26,821	53.6%
	3	54,000	29,350	2,936	32,286	21,714	43.4%
	4	54,000	29,050	3,870	32,920	21,080	42.1%
	5	54,000	29,000	5,741	34,741	19,259	38.5%
	6	54,000	28,700	7,419	36,119	17,881	35.7%
	7	54,000	28,750	9,135	37,885	16,115	32.2%
	8	54,000	28,850	13,976	42,826	11,174	22.3%
	9	54,000	28,850	13,976	42,826	11,174	22.3%
	10	54,000	29,550	13,976	43,526	10,474	20.9%
	11	54,000	28,700	15,813	44,513	9,487	19.0%
	12	54,000	29,100	16,954	46,054	7,946	15.9%
	13	54,000	28,900	17,854	46,754	7,246	14.5%
	14	54,000	28,900	17,854	46,754	7,246	14.5%
	15	54,000	28,700	19,754	48,454	5,546	11.1%
	16	54,000	27,900	32,204	60,104	- 6,104	-12.2%
	17	54,000	27,500	36,186	63,686	- 9,686	-19.4%
	18	54,000	27,100	41,195	68,295	-14,295	-28.6%
	19	51,300	27,100	41,195	68,295	-16,995	-34.0%
	20	49,680	27,100	41,195	68,295	-18,615	-37.2%
	21	48,060	27,100	41,195	68,295	-20,235	-40.4%
	22	45,900	27,100	41,195	68,295	-22,395	-44.7%
	23	43,740	27,100	41,195	68,295	-24,555	-49.1%
	24	42,120	27,100	41,195	68,295	-26,175	-52.3%
	25	27,000	27,100	41,195	68,295	-41,295	-82.5%
	26	32,400	26,650	42,032	68,682	-36,282	-72.5%
	27	16,200	27,100	41,195	68,295	-52,095	-104.1%
	28	9,900	27,100	41,195	68,295	-58,395	-116.7%

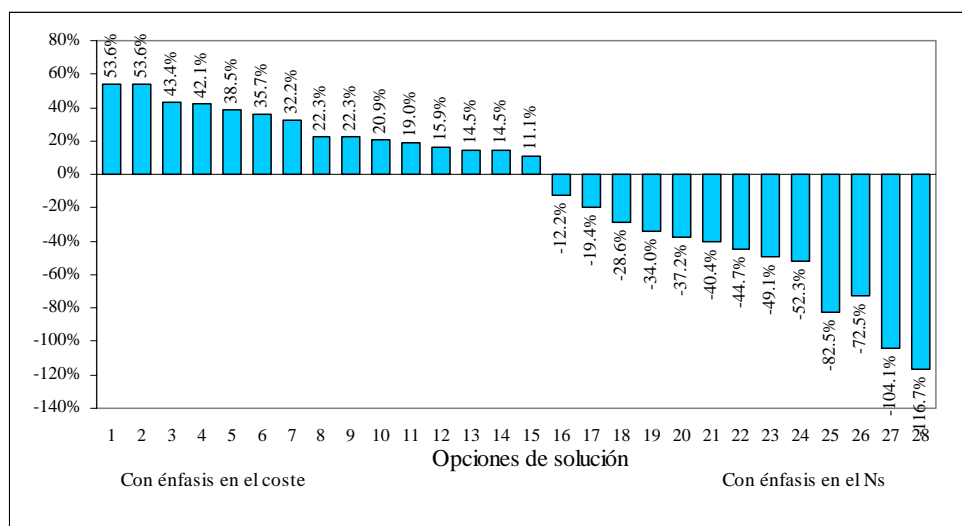


Figura 7.34
Ahorros o pérdidas del proveedor en el contexto del Incoterm ExW (Escenario 2)

- e. No obstante la conveniencia de uno u otro miembro de la cadena, los costes totales del sistema presentan pérdidas para cualquier criterio (coste o nivel de servicio). La magnitud de estas pérdidas se magnifica en la medida en que se busque dar un peso específico por igual. En contraparte, el énfasis en el coste o en nivel de servicio del transporte, podrá lograr la menor diferencia en coste a favor del cliente o para el proveedor (véase las figuras 7.35 y 7.36, así como el cuadro 7.26).

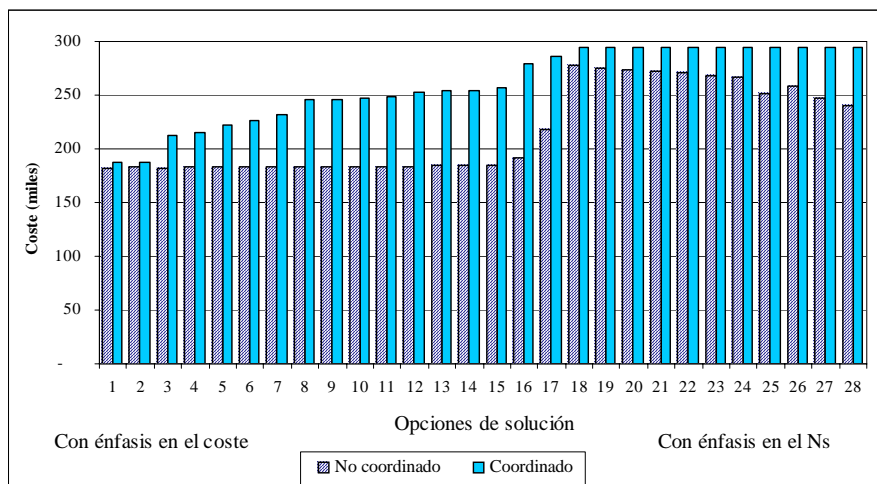


Figura 7.35
Coste total del sistema en el contexto del Incoterm ExW (Escenario 2)

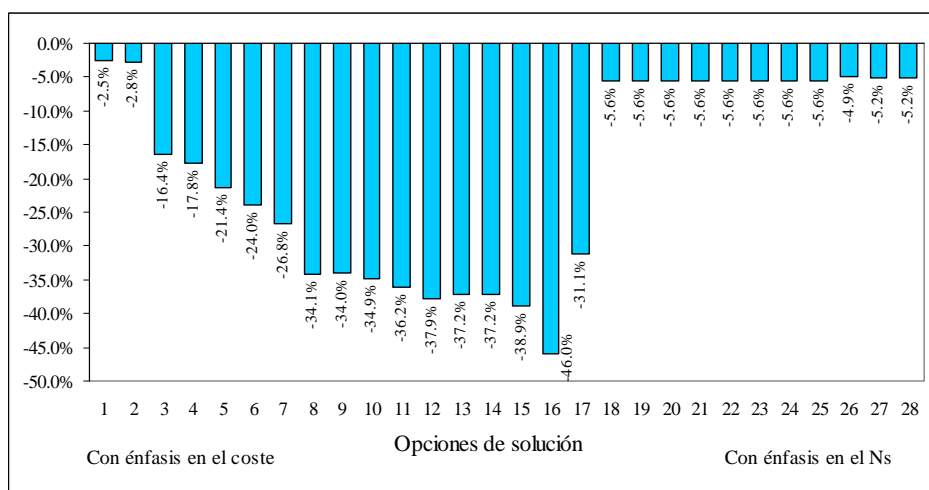


Figura 7.36
Ahorros o pérdidas del sistema en el contexto del Incoterm ExW (Escenario 2)

Cuadro 7.26
Coste total del sistema coordinado y nivel de servicio del transporte
en el contexto del Incoterm ExW (Escenario 2)

Coste total del sistema				Nivel de servicio del transporte			
Sol.	No coordinado	Coordinado	Ahorros o pérdidas	No coordinado	Coordinado	Índice NS no coordinado	Índice NS Coordinado
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
1	182,547	187,152	-2.5%	-1,257,881	-2,226,740	6.89	11.90
2	182,663	187,808	-2.8%	-1,329,676	-2,242,517	7.28	11.94
3	182,590	212,594	-16.4%	-1,300,992	-2,768,514	7.13	13.02
4	182,675	215,254	-17.8%	-1,364,835	-2,811,809	7.47	13.06
5	182,675	221,827	-21.4%	-1,364,835	-2,914,812	7.47	13.14
6	182,675	226,463	-24.0%	-1,364,835	-2,984,485	7.47	13.18
7	182,675	231,623	-26.8%	-1,364,835	-3,062,017	7.47	13.22
8	182,852	245,249	-34.1%	-1,403,516	-3,255,402	7.68	13.27
9	183,065	245,249	-34.0%	-1,398,617	-3,255,402	7.64	13.27
10	182,852	246,652	-34.9%	-1,403,516	-3,277,481	7.68	13.29
11	182,852	248,976	-36.2%	-1,403,516	-3,307,005	7.68	13.28
12	182,852	252,167	-37.9%	-1,403,516	-3,352,112	7.68	13.29
13	184,899	253,610	-37.2%	-1,575,733	-3,370,511	8.52	13.29
14	184,899	253,610	-37.2%	-1,575,733	-3,370,511	8.52	13.29
15	184,899	256,907	-38.9%	-1,575,733	-3,408,923	8.52	13.27
16	191,365	279,331	-46.0%	-1,778,034	-3,664,811	9.29	13.12
17	217,934	285,818	-31.1%	-2,476,842	-3,737,187	11.37	13.08
18	278,325	294,009	-5.6%	-3,826,480	-3,826,480	13.75	13.01
19	278,325	294,009	-5.6%	-3,826,480	-3,826,480	13.88	13.01
20	278,325	294,009	-5.6%	-3,826,480	-3,826,480	13.97	13.01
21	278,325	294,009	-5.6%	-3,826,480	-3,826,480	14.05	13.01
22	278,325	294,009	-5.6%	-3,826,480	-3,826,480	14.16	13.01
23	278,325	294,009	-5.6%	-3,826,480	-3,826,480	14.27	13.01
24	278,325	294,009	-5.6%	-3,826,480	-3,826,480	14.36	13.01
25	278,325	294,009	-5.6%	-3,826,480	-3,826,480	15.23	13.01
26	279,798	294,396	-5.2%	-3,826,480	-3,826,480	14.82	13.00
27	279,798	294,396	-5.2%	-3,826,480	-3,826,480	14.82	13.00
28	279,798	294,396	-5.2%	-3,826,480	-3,826,480	14.82	13.00

- f. Una situación que no se debe perder de vista es el hecho de que el sistema coordinado permite alcanzar un mejor nivel de servicio del transporte cuando se le de mayor énfasis al coste. Sin embargo, para este caso en particular, el índice de servicio no coordinado puede llegar a ser superior que el coordinado debido a su mayor coste (véase figuras 7.37 y 7.38).
- g. Por lo que respecta a la estructura de costes del cliente y del proveedor, ésta es muy similar a la del escenario anterior.

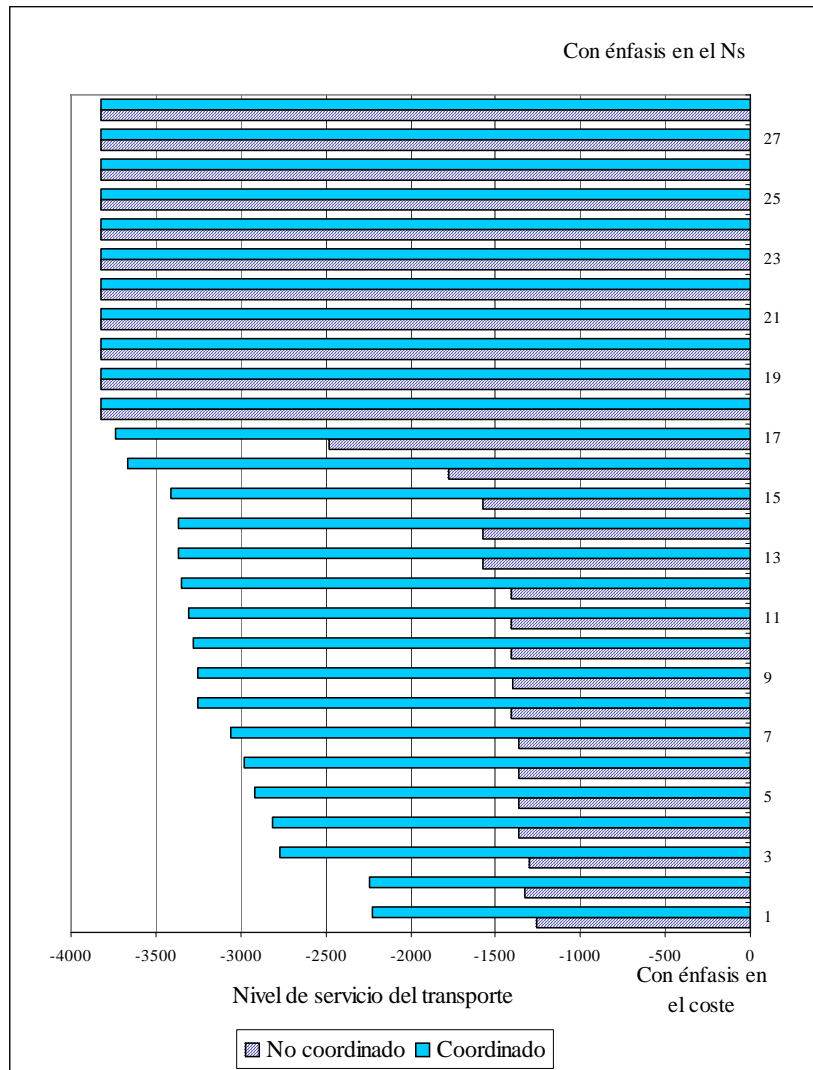


Figura 7.37

Nivel de servicio del transporte en el contexto del *Incoterm ExW* (Escenario 2)

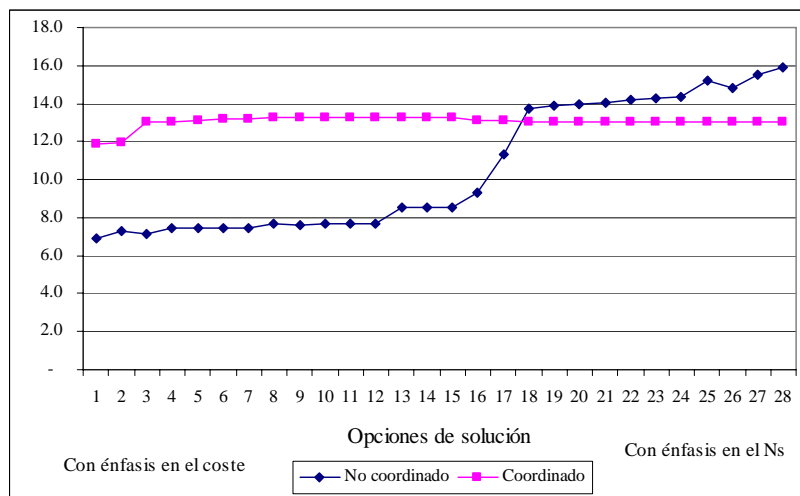


Figura 7.38

Índice de nivel de servicio del transporte con relación al coste

7.5.3 Alternativas no dominadas. Escenario 3

Esta sección presenta los resultados que demuestran el efecto de la instrumentación de la estrategia ECR específicamente bajo el término de comercio internacional ExW, en el contexto del escenario 3 de análisis. Los resultados, se presentan por separado para el cliente, proveedor y de manera conjunta (cliente-proveedor) desde el punto de vista de sistema. De esta manera, los incisos a continuación, resumen los resultados más relevantes.

- a. En un esquema no coordinado con énfasis en el nivel de servicio, por obvias razones el transporte es el principal componente en la estructura de costes; para el caso de estudio resultó ser de casi el 90% de los costes totales del cliente (véase figura 7.39). El uso de modos más rápidos (mejor nivel de servicio) permite realizar entregas con el menor tiempo de ciclo, ocasionando que el coste de inventario sea prácticamente nulo, y los costes por ordenar y de inventario en tránsito sean muy reducidos.

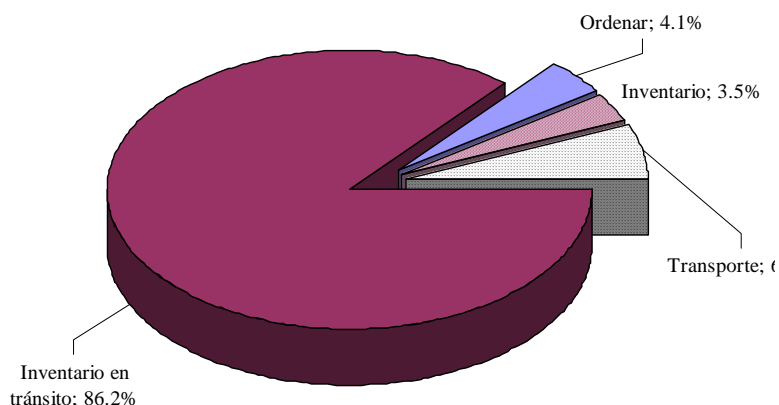


Figura 7.39
Estructura de costes del cliente (sin coordinación)

- b. De acuerdo con los resultados en este escenario, el esquema no coordinado con base en el criterio de nivel de servicio, se observa que tiene desventaja con respecto a un esquema coordinado que considera ambos criterios (coste y nivel de servicio de transporte). Cuando en el sistema coordinado el énfasis está más del lado del coste, pueden alcanzarse ahorros de hasta el 34%. En la medida que se avanza hacia una preferencia del nivel de servicio, los ahorros del sistema se reducen gradualmente (véase cuadro 7.27 y figuras 7.40 y 7.41).

Cuadro 7.27
Ahorros y pérdidas del sistema y nivel de servicio del transporte

Dirección	Sol.	Coste total de sistema			Nivel de servicio del transporte			
		No coordinado	Coordinado	Ahorros o pérdidas	No coordinado	Coordinado	Índice no coordinado	Índice coordinado
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
↑ Preferencia al coste ↓ Preferencia al nivel de servicio de transporte	1	284,807	187,149	34.3%	- 3,826,480	-2,226,740	5.45	11.90
	2	284,807	187,804	34.1%	- 3,826,480	-2,242,517	5.76	11.94
	3	284,807	212,593	25.4%	- 3,826,480	-2,768,514	5.64	13.02
	4	284,807	215,255	24.4%	- 3,826,480	-2,811,809	5.91	13.06
	5	284,807	221,827	22.1%	- 3,826,480	-2,914,812	5.91	13.14
	6	284,807	226,464	20.5%	- 3,826,480	-2,984,485	5.91	13.18
	7	284,807	231,623	18.7%	- 3,826,480	-3,062,017	5.91	13.22
	8	284,807	245,249	13.9%	- 3,826,480	-3,255,402	6.08	13.27
	9	284,807	245,249	13.9%	- 3,826,480	-3,255,402	6.06	13.27
	10	284,807	246,652	13.4%	- 3,826,480	-3,277,481	6.08	13.29
	11	284,807	248,975	12.6%	- 3,826,480	-3,307,005	6.08	13.28
	12	284,807	252,169	11.5%	- 3,826,480	-3,352,112	6.08	13.29
	13	284,807	253,612	11.0%	- 3,826,480	-3,370,511	6.83	13.29
	14	284,807	253,612	11.0%	- 3,826,480	-3,370,511	6.83	13.29
	15	284,807	256,911	9.8%	- 3,826,480	-3,408,923	6.83	13.27
	16	284,807	279,335	5.4%	- 3,826,480	-3,664,811	7.70	13.12
	17	284,807	278,827	3.6%	- 3,826,480	-3,737,187	10.73	13.08
	18	284,807	278,223	2.3%	- 3,826,480	-3,826,480	16.58	13.75
	19	284,807	278,223	2.3%	- 3,826,480	-3,826,480	16.58	13.75
	20	284,807	278,223	2.3%	- 3,826,480	-3,826,480	16.58	13.75
	21	284,807	278,223	2.3%	- 3,826,480	-3,826,480	16.58	13.75
	22	284,807	278,223	2.3%	- 3,826,480	-3,826,480	16.58	13.75
	23	284,807	278,223	2.3%	- 3,826,480	-3,826,480	16.58	13.75
	24	284,807	278,223	2.3%	- 3,826,480	-3,826,480	16.58	13.75
	25	284,807	278,223	2.3%	- 3,826,480	-3,826,480	16.58	13.75
	26	284,807	278,223	2.3%	- 3,826,480	-3,826,480	16.58	13.75
	27	284,807	278,223	2.3%	- 3,826,480	-3,826,480	16.58	13.75
	28	284,807	278,223	2.3%	- 3,826,480	-3,826,480	16.58	13.75

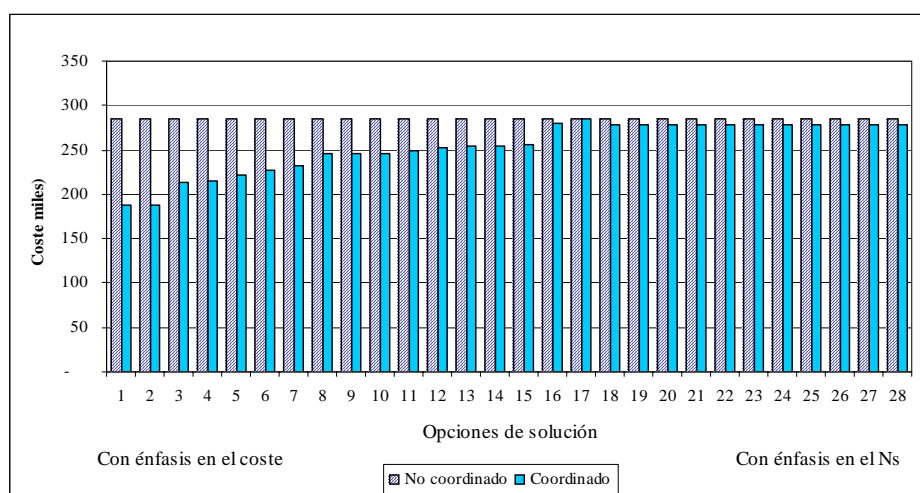


Figura 7.40
Coste total del sistema en el contexto del Incoterm ExW (Escenario 3)

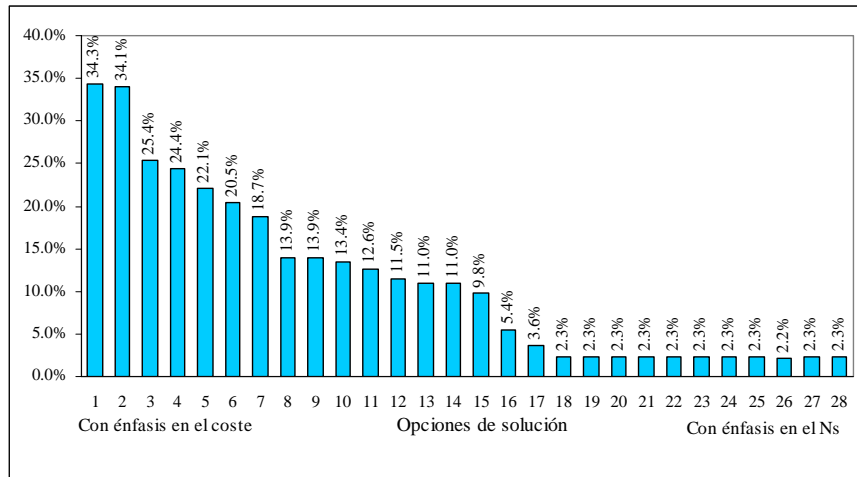


Figura 7.41
Ahorros del sistema en el contexto del Incoterm ExW (Escenario 3)

c. De acuerdo con los resultados obtenidos en un sistema no coordinado, a partir de las figuras 7.42 y 7.43, puede establecerse que el nivel de servicio de transporte es superior al del sistema coordinado cuando el énfasis está más orientado hacia el coste. Sin embargo, el nivel de servicio se iguala en la medida que el énfasis en el sistema coordinado vaya cambiando en este sentido. Por su parte, el índice de nivel de servicio del transporte será un poco más favorable para el sistema no coordinado (véase figuras 7.42 y 7.43).

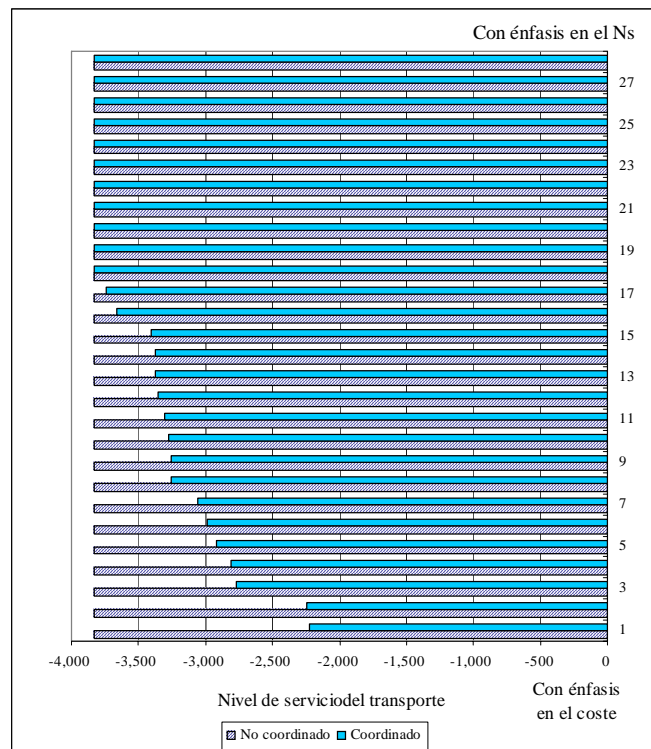


Figura 7.42
Nivel de servicio del transporte bajo el Incoterm ExW

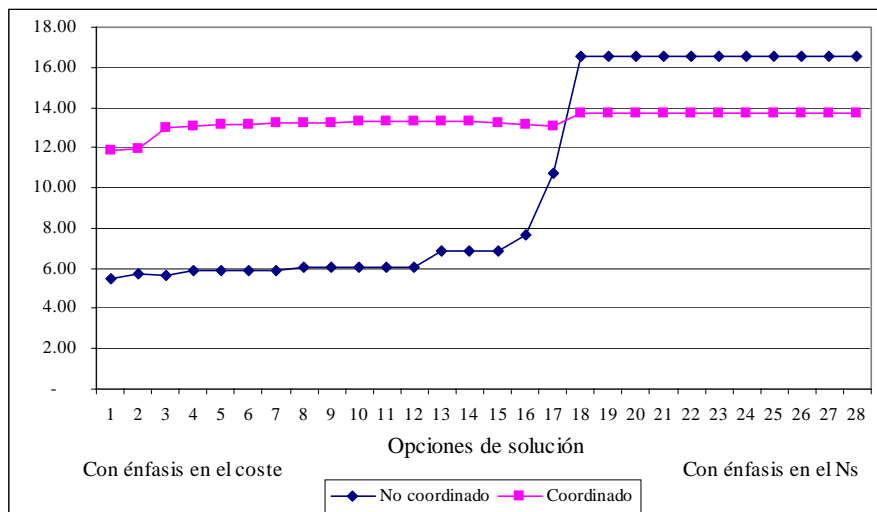


Figura 7.43
Índice de nivel de servicio del transporte con relación al coste

d. En este escenario, el cliente podrá disfrutar de ahorros derivados de una reducción de sus costes por ordenar y del inventario en tránsito, siempre y cuando los costes de transporte (combinación de modos con mayor nivel de servicio) no presenten un crecimiento explosivo. El efecto de la coordinación le permite ahorros hasta del 30%. Por los ahorros y sobre todo por la magnitud de las pérdidas obtenidos, se observa que una tasa mayor de descuento en el precio de los productos, podría ayudar no sólo para que los ahorros aumenten, sino para que el número de soluciones no dominadas (alternativas para el cliente) se incrementen (véase figura 7.44 y cuadro 7.28).

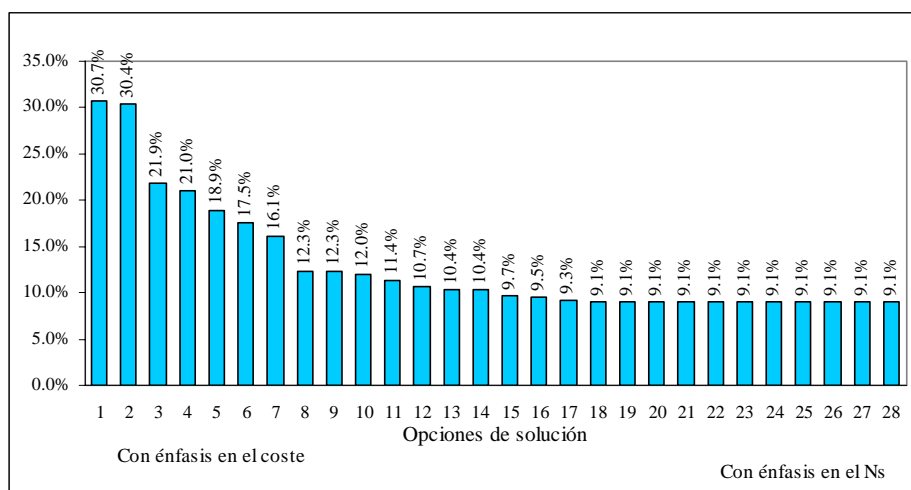


Figura 7.44
Ahorro del cliente en el contexto del Incoterm ExW (Escenario 3)

Cuadro 7.28
Costes del cliente bajo el Incoterm ExW (Escenario 3)

Dirección	Sol.	Coste del cliente no coordinado	Coste del cliente coordinado					Diferencia	Ahorros o pérdidas	
			Ordenar	Inventario	Inventario en tránsito	Transporte	Descuento			Total
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
Preferencia al coste → ↓ Preferencia al nivel de servicio de transporte	1	230,807	9,921	1,035	36,562	114,034	1,561	159,990	70,817	30.7%
	2	230,807	9,921	1,050	36,365	114,872	1,579	160,629	70,178	30.4%
	3	230,807	9,311	3,021	27,073	143,839	2,936	180,308	50,499	21.9%
	4	230,807	9,011	4,257	26,844	146,091	3,870	182,334	48,473	21.0%
	5	230,807	8,631	6,507	26,201	151,488	5,741	187,086	43,721	18.9%
	6	230,807	8,331	8,486	25,833	155,113	7,419	190,344	40,463	17.5%
	7	230,807	8,001	10,532	25,163	159,177	9,135	193,738	37,070	16.1%
	8	230,807	7,341	16,033	23,735	169,291	13,976	202,423	28,384	12.3%
	9	230,807	7,341	16,033	23,735	169,291	13,976	202,423	28,384	12.3%
	10	230,807	7,341	16,033	23,245	170,483	13,976	203,126	27,681	12.0%
	11	230,807	7,036	18,173	23,071	171,997	15,813	204,463	26,344	11.4%
	12	230,807	6,766	19,587	22,329	174,385	16,954	206,113	24,694	10.7%
	13	230,807	6,581	20,672	22,115	175,342	17,854	206,856	23,951	10.4%
	14	230,807	6,581	20,672	22,115	175,342	17,854	206,856	23,951	10.4%
	15	230,807	6,436	22,719	21,711	177,341	19,754	208,453	22,354	9.7%
	16	230,807	6,021	35,584	19,174	190,653	32,204	219,227	11,580	9.5%
	17	230,807	5,621	39,971	18,308	194,418	36,186	222,132	8,675	9.3%
	18	230,807	5,221	45,385	17,241	199,063	41,195	209,914	20,893	9.1%
	19	230,807	5,221	45,385	17,241	199,063	41,195	209,914	20,893	9.1%
	20	230,807	5,221	45,385	17,241	199,063	41,195	209,914	20,893	9.1%
	21	230,807	5,221	45,385	17,241	199,063	41,195	209,914	20,893	9.1%
	22	230,807	5,221	45,385	17,241	199,063	41,195	209,914	20,893	9.1%
	23	230,807	5,221	45,385	17,241	199,063	41,195	209,914	20,893	9.1%
	24	230,807	5,221	45,385	17,241	199,063	41,195	209,914	20,893	9.1%
	25	230,807	5,221	45,385	17,241	199,063	41,195	209,914	20,893	9.1%
	26	230,807	5,221	45,385	17,241	199,063	41,195	209,914	20,893	9.1%
	27	230,807	5,221	45,385	17,241	199,063	41,195	209,914	20,893	9.1%
	28	230,807	5,221	45,385	17,241	199,063	41,195	209,914	20,893	9.1%

e. Por lo que respecta al proveedor, el resultado de la coordinación le representa una situación muy similar a la del cliente. Es decir, también puede obtener ahorros (hasta del 50%) para el caso de que el peso específico sea mayor para el coste con relación al criterio de nivel de servicio. Sin embargo, cuando se otorga mayor importancia al nivel de servicio, las pérdidas incurrido por este actor ya no son tan conservadores (alrededor del 26%); sobre todo, a partir de que el descuento en el precio de los productos es superior a sus costes fijos. Contrario al cliente, el proveedor tendrá menos alternativas de solución favorables con un aumento en la tasa de descuento en los precios (véase cuadro 7.29 y la figura 7.45).

Cuadro 7.29
Ahorros o pérdidas del proveedor (Escenario 3)

Dirección		Coste fijo no coordinado	Coste fijo coordinado	Descuento en el precio de los productos	Total	Diferencia	Ahorros o pérdidas
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
↑ Preferencia al coste ↓ Preferencia al nivel de servicio de transporte	1	54,000	25,600	1,561	27,159	26,841	49.7%
	2	54,000	25,600	1,579	27,174	26,826	49.7%
	3	54,000	29,350	2,936	32,285	21,715	40.2%
	4	54,000	29,050	3,870	32,921	21,079	39.0%
	5	54,000	29,000	5,741	34,741	19,259	35.7%
	6	54,000	28,700	7,419	36,120	17,880	33.1%
	7	54,000	28,750	9,135	37,886	16,114	29.8%
	8	54,000	28,850	13,976	42,826	11,174	20.7%
	9	54,000	28,850	13,976	42,826	11,174	20.7%
	10	54,000	29,550	13,976	43,526	10,474	19.4%
	11	54,000	28,700	15,813	44,511	9,489	17.6%
	12	54,000	29,100	16,954	46,056	7,944	14.7%
	13	54,000	28,900	17,854	46,756	7,244	13.4%
	14	54,000	28,900	17,854	46,756	7,244	13.4%
	15	54,000	28,700	19,754	48,458	5,542	10.3%
	16	54,000	27,900	32,204	60,107	-6,107	-11.3%
	17	54,000	27,500	36,186	63,695	-9,695	-18.0%
	18	54,000	27,100	41,195	68,308	-14,308	-26.5%
	19	54,000	27,100	41,195	68,308	-14,308	-26.5%
	20	54,000	27,100	41,195	68,308	-14,308	-26.5%
	21	54,000	27,100	41,195	68,308	-14,308	-26.5%
	22	54,000	27,100	41,195	68,308	-14,308	-26.5%
	23	54,000	27,100	41,195	68,308	-14,308	-26.5%
	24	54,000	27,100	41,195	68,308	-14,308	-26.5%
	25	54,000	27,100	41,195	68,308	-14,308	-26.5%
	26	54,000	27,100	41,195	68,308	-14,308	-26.5%
	27	54,000	27,100	41,195	68,308	-14,308	-26.5%
	28	54,000	27,100	41,195	68,308	-14,308	-26.5%

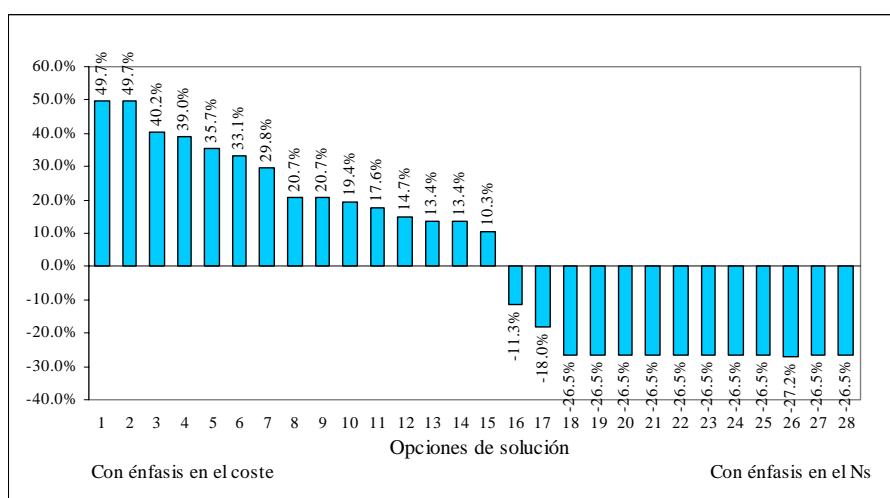


Figura 7.45
Ahorros y pérdidas del proveedor en el contexto del Incoterm ExW (Escenario 3)

- f. Por lo anterior, este escenario permite observar el límite máximo sobre la decisión del nivel de servicio de transporte: los resultados obtenidos así lo demuestran. Para el caso de estudio, la coordinación resultó benéfica tanto para el cliente como para el proveedor en el mismo segmento de soluciones no dominadas. Por esto, es evidente la existencia de ahorros en el sistema para el caso en el que ambos actores otorguen mayor valor específico a los costes, a pesar de que el índice de nivel de servicio del transporte con relación al coste, sea favorable para el esquema no coordinado (véase figuras 7.41 y 7.43 anteriores).
- g. En un esquema coordinado, el efecto en la estructura de costes del cliente se presenta, principalmente, con una mayor participación del coste en inventario que va tomando el lugar de los costes del inventario en tránsito en la medida que se le otorga mayor importancia al nivel de servicio de transporte que al coste (véase cuadro 7.30).

Cuadro 7.30
Estructura de costes del cliente coordinado (Escenario 3)

Dirección	Sol.	Ordenar	Inventario	Inventario en tránsito	Transporte	Total
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
↑ Preferencia al coste ↓ Preferencia al nivel de servicio de transporte	1	6.1%	0.6%	22.6%	70.6%	100.0%
	2	6.1%	0.6%	22.4%	70.8%	100.0%
	3	5.1%	1.6%	14.8%	78.5%	100.0%
	4	4.8%	2.3%	14.4%	78.5%	100.0%
	5	4.5%	3.4%	13.6%	78.6%	100.0%
	6	4.2%	4.3%	13.1%	78.4%	100.0%
	7	3.9%	5.2%	12.4%	78.5%	100.0%
	8	3.4%	7.4%	11.0%	78.2%	100.0%
	9	3.4%	7.4%	11.0%	78.2%	100.0%
	10	3.4%	7.4%	10.7%	78.5%	100.0%
	11	3.2%	8.2%	10.5%	78.1%	100.0%
	12	3.0%	8.8%	10.0%	78.2%	100.0%
	13	2.9%	9.2%	9.8%	78.0%	100.0%
	14	2.9%	9.2%	9.8%	78.0%	100.0%
	15	2.8%	10.0%	9.5%	77.7%	100.0%
	16	2.4%	14.2%	7.6%	75.8%	100.0%
	17	2.2%	15.5%	7.1%	75.3%	100.0%
	18	2.0%	17.0%	6.5%	74.6%	100.0%
	19	2.0%	17.0%	6.5%	74.6%	100.0%
	20	2.0%	17.0%	6.5%	74.6%	100.0%
	21	2.0%	17.0%	6.5%	74.6%	100.0%
	22	2.0%	17.0%	6.5%	74.6%	100.0%
	23	2.0%	17.0%	6.5%	74.6%	100.0%
	24	2.0%	17.0%	6.5%	74.6%	100.0%
	25	2.0%	17.0%	6.5%	74.6%	100.0%
	26	2.0%	17.0%	6.5%	74.6%	100.0%
	27	2.0%	17.0%	6.5%	74.6%	100.0%
	28	2.0%	17.0%	6.5%	74.6%	100.0%

- h. Para el proveedor, la estructura de costes está relacionado directamente con el intercambio (*tradeoff*) que presenta sus costes fijos con respecto al descuento que otorga al cliente y que éste los asume. De igual manera, en la medida que la coordinación usa modos de transporte más eficientes (rápidos), el descuento llega a superar los costes fijos, provocándole pérdidas significativas (véase figura 7.46).

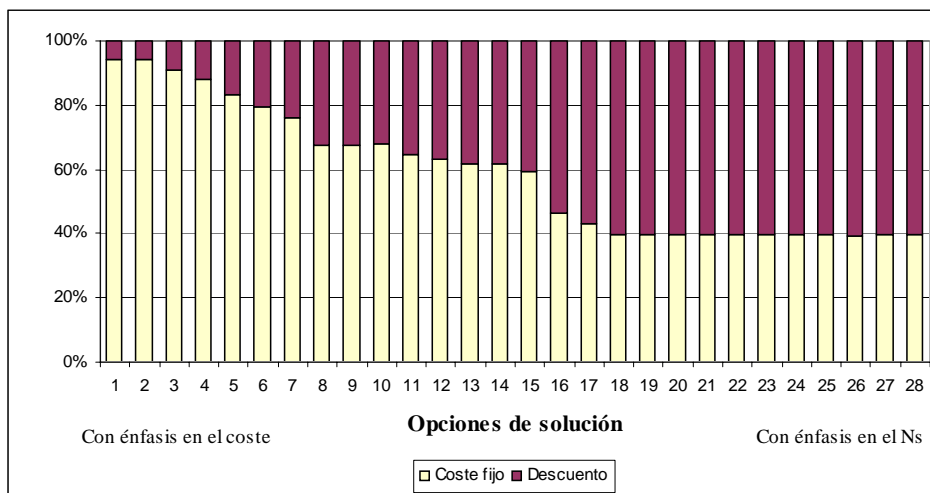


Figura 7.46

Estructura de costes del proveedor coordinado en el contexto del Incoterm ExW

7.5.4 Alternativas no dominadas. Escenario 4

Esta sección presenta los resultados que demuestran el efecto de la instrumentación de la estrategia ECR específicamente bajo el término de comercio internacional DDP, en el contexto del escenario 4 de análisis. Los resultados, se presentan por separado para el cliente, proveedor y de manera conjunta (cliente-proveedor) desde el punto de vista de sistema. De esta manera, los incisos a continuación, resumen los resultados más relevantes.

- a. De acuerdo con los resultados obtenidos, la operatividad del modelo en un ambiente de negociación DDP permite observar cabalmente una adecuada aproximación del comportamiento de las variables de decisión a la situación real. Debido a que el proveedor se encarga prácticamente de toda actividad logística para abastecer a su cliente, buscará encarecidamente reducir los costes de envío y mantener sus costes fijos lo más bajo posible, o al menos igual que en una negociación ExW; compárese los cuadros 7.19 (ver escenario 1) contra el cuadro 7.31 a continuación. En dicha comparación se observa que los costes fijos mantienen cierta estabilidad en ambos

tipos de *Incoterms* (ExW y DDP), no así el descuento en el precio de los productos que son mayores para el caso del *Incoterm* DDP. Esto se debe principalmente a que el tamaño del lote es más grande, lo que implica mayores descuentos. Más específicamente, el modelo DDP determina lotes de envío más grandes (consolidación) que impacta en los siguientes aspectos:

- a.1) Aumenta el coste de inventario, el cual se ve reflejado en tasas de descuento (z_{li}) mayores con respecto a un escenario ExW (véase cuadros 7.17 y 7.32); cabe destacar que los productos 4 y 5 mantienen una tasa de descuento casi constante a lo largo de todas las opciones evaluadas (véase figura 7.47).

Cuadro 7.31
Costes del proveedor en el contexto del *Incoterm* DDP (Escenario 4)

Dirección	Sol.	Coste fijo coordinado	Descuento en el precio	Descuento en la tarifa de transporte	Total ⁽¹⁾
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
↑ Preferencia al coste ↓ Preferencia al nivel de servicio de transporte	1	26,500	23,606	13,473	50,106
	2	26,500	23,606	13,473	50,106
	3	26,500	23,606	13,473	50,106
	4	26,400	23,700	13,495	50,100
	5	26,500	23,606	13,473	50,106
	6	26,400	23,700	13,495	50,100
	7	26,400	23,700	13,495	50,100
	8	26,400	23,700	13,495	50,100
	9	26,250	23,759	13,885	50,009
	10	25,450	24,632	14,747	50,082
	11	24,250	26,514	17,289	50,764
	12	22,600	30,521	22,166	53,121
	13	20,850	36,316	30,975	57,166
	14	20,850	36,316	29,819	57,166
	15	20,850	36,319	28,952	57,169
	16	20,850	36,319	28,663	57,169
	17	20,850	36,316	28,230	57,166
	18	20,850	36,329	28,013	57,179
	19	20,850	36,339	28,013	57,189
	20	20,850	36,329	28,013	57,179
	21	20,850	36,359	28,013	57,209
	22	20,850	36,359	28,013	57,209
	23	20,850	36,452	28,013	57,302
	24	20,850	36,437	28,013	57,287
	25	21,200	36,313	28,013	57,513
	26	21,200	36,313	28,013	57,513
	27	21,200	36,313	28,013	57,513
	28	21,200	36,313	28,013	57,513

Nota: (1) No incluye coste de transporte y descuento en las tarifas. El coste de transporte se transfiere al cliente y el descuento al transportista por medio de una mejor negociación.

Cuadro 7.32

Descuento total en el precio de los productos en el contexto del Incoterm DDP (Escenario 4)

Tasa de descuento						Coste total anual de compra por producto					Descuento total en el precio de los productos
						3,015,103	925,111	4,062,273	2,877,556	1,673,226	
						Descuento por período					
Sol.	z_{11}	z_{12}	z_{13}	z_{14}	z_{15}	Producto 1	Producto 2	Producto 3	Producto 4	Producto 5	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
1	0.08%	0.30%	0.18%	0.14%	0.41%	2,270	2,784	7,450	4,161	6,941	23,606
2	0.08%	0.30%	0.18%	0.14%	0.41%	2,270	2,784	7,450	4,161	6,941	23,606
3	0.08%	0.30%	0.18%	0.14%	0.41%	2,270	2,784	7,450	4,161	6,941	23,606
4	0.12%	0.30%	0.15%	0.14%	0.41%	3,612	2,784	6,203	4,161	6,941	23,700
5	0.08%	0.30%	0.18%	0.14%	0.41%	2,270	2,784	7,450	4,161	6,941	23,606
6	0.12%	0.30%	0.15%	0.14%	0.41%	3,612	2,784	6,203	4,161	6,941	23,700
7	0.12%	0.30%	0.15%	0.14%	0.41%	3,612	2,784	6,203	4,161	6,941	23,700
8	0.12%	0.30%	0.15%	0.14%	0.41%	3,612	2,784	6,203	4,161	6,941	23,700
9	0.10%	0.25%	0.18%	0.14%	0.41%	2,931	2,277	7,450	4,161	6,941	23,759
10	0.12%	0.27%	0.18%	0.14%	0.41%	3,612	2,504	7,414	4,161	6,941	24,632
11	0.09%	0.20%	0.26%	0.16%	0.41%	2,587	1,870	10,521	4,595	6,941	26,514
12	0.11%	0.25%	0.31%	0.16%	0.46%	3,422	2,315	12,496	4,595	7,693	30,521
13	0.25%	0.33%	0.33%	0.16%	0.46%	7,580	3,083	13,341	4,618	7,693	36,316
14	0.25%	0.33%	0.33%	0.16%	0.46%	7,580	3,083	13,341	4,618	7,693	36,316
15	0.25%	0.33%	0.33%	0.16%	0.46%	7,417	3,083	13,475	4,650	7,693	36,319
16	0.25%	0.33%	0.33%	0.16%	0.46%	7,417	3,083	13,475	4,650	7,693	36,319
17	0.25%	0.33%	0.33%	0.16%	0.46%	7,580	3,083	13,341	4,618	7,693	36,316
18	0.26%	0.33%	0.32%	0.16%	0.46%	7,767	3,083	13,190	4,595	7,693	36,329
19	0.26%	0.33%	0.32%	0.16%	0.46%	7,821	3,083	13,146	4,595	7,693	36,339
20	0.26%	0.33%	0.32%	0.16%	0.46%	7,767	3,083	13,190	4,595	7,693	36,329
21	0.26%	0.33%	0.32%	0.16%	0.46%	7,951	3,083	13,036	4,595	7,693	36,359
22	0.26%	0.33%	0.32%	0.16%	0.46%	7,951	3,083	13,036	4,595	7,693	36,359
23	0.27%	0.33%	0.32%	0.16%	0.46%	8,138	3,083	12,881	4,656	7,693	36,452
24	0.27%	0.33%	0.31%	0.16%	0.46%	8,240	3,083	12,764	4,656	7,693	36,437
25	0.25%	0.33%	0.33%	0.16%	0.46%	7,673	3,083	13,267	4,595	7,693	36,313
26	0.25%	0.33%	0.33%	0.16%	0.46%	7,595	3,083	13,247	4,731	7,693	36,350
27	0.25%	0.33%	0.33%	0.16%	0.46%	7,595	3,083	13,247	4,731	7,693	36,350
28	0.25%	0.33%	0.33%	0.16%	0.46%	7,595	3,083	13,247	4,731	7,693	36,350

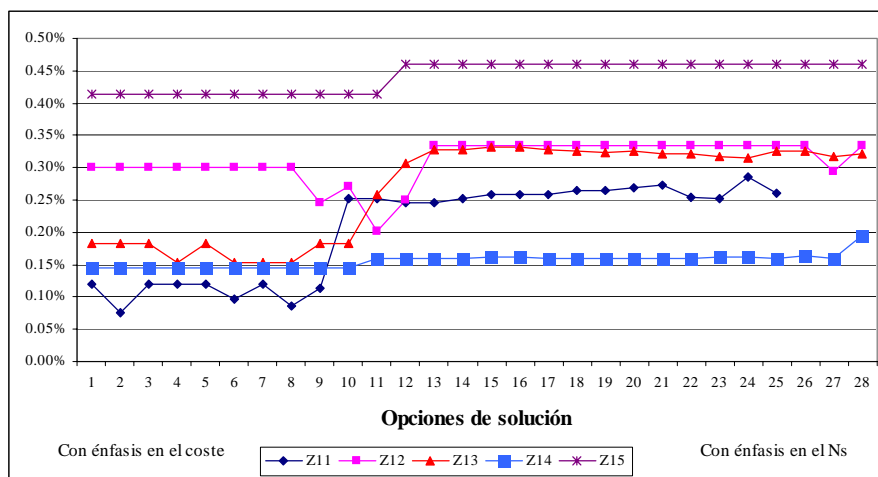


Figura 7.47

Tasa de descuento en el precio de los productos (Incoterm DDP)

a.2) Se obtienen menores costes de transporte con respecto al escenario ExW y muy similares al esquema no coordinado; sin embargo, la tasas de descuento (z_{2m}) son muy grandes y oscilan entre 0.9% y 17.6%; dichos

descuentos, en promedio representan aproximadamente el 24% del coste del cliente. La figura 7.48, por su parte, además de mostrar la combinación de las tasas de descuento en la tarifa para cada una de las opciones analizadas, exhibe también, con bastante claridad, el punto de intercambio sobre las decisiones de descuento.

- a.3) Los costes de inventario en tránsito mantiene un participación importante en la estructura de costes (31% en promedio); y finalmente,
- a.4) El número de ordenes es menor y por lo tanto su coste.

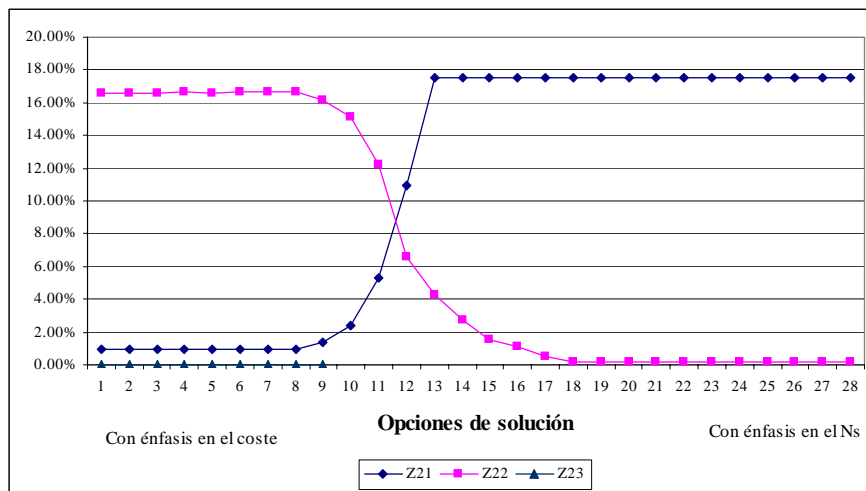


Figura 7.48
Comportamiento de la tasa de descuento en la tarifa de transporte

- b. Específicamente para el caso del cliente, la coordinación resultó benéfica en todas las opciones; los ahorros obtenidos oscilan entre 11% y 14% con relación a la alternativa no coordinada basada en el coste (véase cuadro 7.33 y figura 7.49). Es interesante observar en dicho cuadro, que el modelo simula con bastante aproximación el ambiente que priva en los contextos en los escenarios ExW y DDP. En primer lugar, los costes por ordenar son menores con relación a un enfoque ExW; segundo, los costes de inventario y transporte son muy similares hasta cierto punto; y tercero, el descuento en el precio de los productos y en la tarifa de transporte, compensan los costes de inventario en los que incurre el cliente. Todo lo anterior, se debe a que los lotes resultaron ser más grandes, lo que permite lograr una mejor consolidación de cargas aprovechando los modos de transporte con mejor nivel de servicio. De hecho, la estructura de costes muestra un equilibrio relativo entre todos sus componentes (véase cuadro 7.34). Los picos en la figura 7.49,

representa las sumas de los descuentos que resultaron ser las más grandes en esas opciones de solución.

Cuadro 7.33
Ahorros o pérdidas del cliente bajo el Incoterm DDP (Escenario 4)

Sol.	Coste total del cliente sin coordinación	Costes del cliente bajo un esquema coordinado						Diferencia	Ahorros o pérdidas	
		Ordenar	Inventario	Inventario en tránsito	Transporte	Descuento en el precio del producto	Descuento en la tarifa de transporte			Total
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
1	128,547	6,591	26,417	53,707	64,869	23,606	13,473	114,504	14,043	10.9%
2	128,547	6,591	26,417	53,707	64,869	23,606	13,473	114,504	14,043	10.9%
3	128,547	6,591	26,417	53,707	64,869	23,606	13,473	114,504	14,043	10.9%
4	128,547	6,436	26,669	53,786	64,879	23,700	13,495	114,574	13,972	10.9%
5	128,547	6,591	26,417	53,707	64,869	23,606	13,473	114,504	14,043	10.9%
6	128,547	6,436	26,669	53,786	64,879	23,700	13,495	114,574	13,972	10.9%
7	128,547	6,436	26,669	53,786	64,879	23,700	13,495	114,574	13,972	10.9%
8	128,547	6,436	26,669	53,786	64,879	23,700	13,495	114,574	13,972	10.9%
9	128,547	6,661	26,501	53,627	65,270	23,759	13,885	114,415	14,132	11.0%
10	128,547	6,521	27,512	53,475	66,142	24,632	14,747	114,271	14,275	11.1%
11	128,547	6,751	29,164	52,883	68,685	26,514	17,289	113,679	14,868	11.6%
12	128,547	6,281	33,640	52,457	73,561	30,521	22,166	113,252	15,295	11.9%
13	128,547	5,666	40,057	51,702	79,264	36,316	30,975	109,399	19,148	14.9%
14	128,547	5,666	40,057	51,702	79,264	36,316	29,819	110,555	17,992	14.0%
15	128,547	5,666	40,061	51,636	79,264	36,319	28,952	111,355	17,191	13.4%
16	128,547	5,666	40,061	51,636	79,264	36,319	28,663	111,644	16,902	13.1%
17	128,547	5,666	40,057	51,702	79,264	36,316	28,230	112,144	16,403	12.8%
18	128,547	5,666	40,069	52,155	79,264	36,329	28,013	112,811	15,736	12.2%
19	128,547	5,666	40,079	52,169	79,264	36,339	28,013	112,826	15,721	12.2%
20	128,547	5,666	40,069	52,155	79,264	36,329	28,013	112,811	15,736	12.2%
21	128,547	5,666	40,102	52,195	79,264	36,359	28,013	112,855	15,691	12.2%
22	128,547	5,666	40,102	52,195	79,264	36,359	28,013	112,855	15,691	12.2%
23	128,547	5,666	40,196	51,624	79,264	36,452	28,013	112,285	16,261	12.7%
24	128,547	5,611	40,233	51,636	79,264	36,437	28,013	112,293	16,253	12.6%
25	128,547	5,666	40,052	52,121	79,264	36,313	28,013	112,776	15,770	12.3%
26	128,547	5,566	40,189	52,022	79,264	36,350	28,013	112,678	15,869	12.3%
27	128,547	5,751	40,182	52,271	79,264	36,526	28,013	112,929	15,618	12.1%
28	128,547	5,566	41,152	51,505	79,264	37,312	28,013	112,162	16,385	12.7%

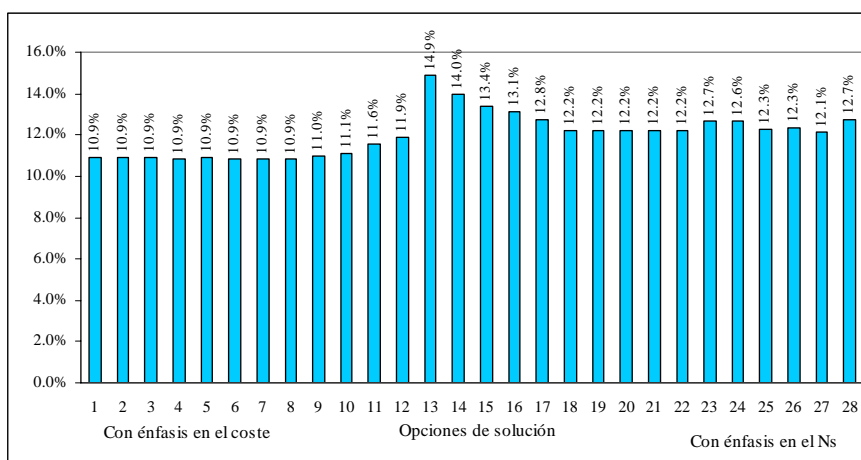


Figura 7.49
Ahorros del cliente

Cuadro 7.34
Estructura de costes del cliente (Escenario 4)

Dirección	Número de opciones	Ordenar	Inventario	Inventario en tránsito	Transporte	Total
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
↑ Preferencia al coste ↓ Preferencia al nivel de servicio de transporte	1	4.3%	17.4%	35.4%	42.8%	100%
	2	4.3%	17.4%	35.4%	42.8%	100%
	3	4.3%	17.4%	35.4%	42.8%	100%
	4	4.2%	17.6%	35.4%	42.7%	100%
	5	4.3%	17.4%	35.4%	42.8%	100%
	6	4.2%	17.6%	35.4%	42.7%	100%
	7	4.2%	17.6%	35.4%	42.7%	100%
	8	4.2%	17.6%	35.4%	42.7%	100%
	9	4.4%	17.4%	35.3%	42.9%	100%
	10	4.2%	17.9%	34.8%	43.0%	100%
	11	4.3%	18.5%	33.6%	43.6%	100%
	12	3.8%	20.3%	31.6%	44.3%	100%
	13	3.2%	22.7%	29.3%	44.9%	100%
	14	3.2%	22.7%	29.3%	44.9%	100%
	15	3.2%	22.7%	29.2%	44.9%	100%
	16	3.2%	22.7%	29.2%	44.9%	100%
	17	3.2%	22.7%	29.3%	44.9%	100%
	18	3.2%	22.6%	29.4%	44.7%	100%
	19	3.2%	22.6%	29.4%	44.7%	100%
	20	3.2%	22.6%	29.4%	44.7%	100%
	21	3.2%	22.6%	29.5%	44.7%	100%
	22	3.2%	22.6%	29.5%	44.7%	100%
	23	3.2%	22.7%	29.2%	44.8%	100%
	24	3.2%	22.8%	29.2%	44.8%	100%
	25	3.2%	22.6%	29.4%	44.8%	100%
	26	3.1%	22.7%	29.4%	44.8%	100%
	27	3.1%	22.7%	29.4%	44.8%	100%
	28	3.1%	22.7%	29.4%	44.8%	100%

c. En la figura 7.50 se observa que el proveedor muestra ahorros en las opciones basadas en el coste. En la medida en que se prefiere un mejor nivel de servicio, presenta pérdidas de alrededor del -6.0%.

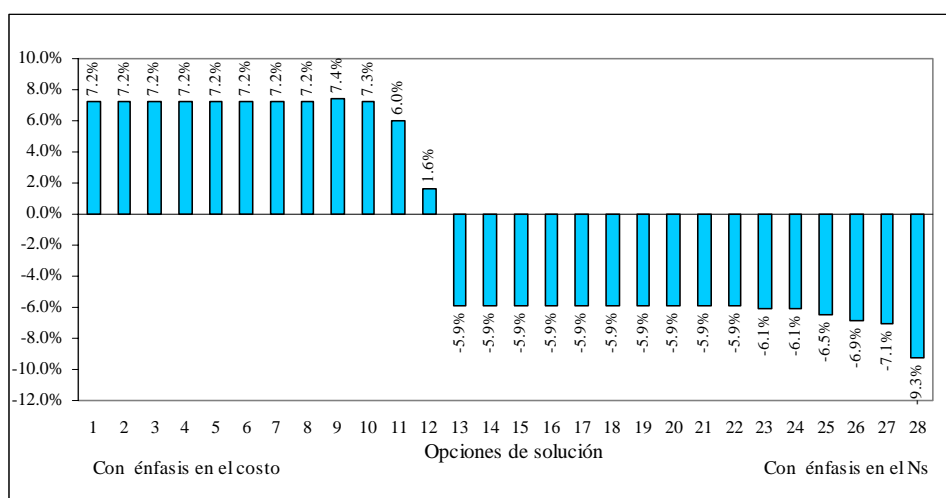


Figura 7.50
Ahorros y pérdidas del proveedor

d. De acuerdo con el cuadro 7.35 es evidente que el coste por descuento en el precio los productos que asume el proveedor, es un elemento que le hace perder competitividad. En este escenario, todo parece indicar que el 10% de descuento sobre el coste no coordinado del cliente, no le es favorable. De manera particular, los costes por descuento son mayores y representan entre el 10% y 70% más con respecto al coste fijo; lo anterior, implica la necesidad de replantear alguna otra alternativa de descuento; quizá sólo aplicada a ciertos productos o especificar diferentes niveles de descuento para cada uno de éstos.

Cuadro 7.35
Ahorros y pérdidas del proveedor bajo el Incoterm DDP (Escenario 4)

Dirección	Sol.	Coste fijo del proveedor no coordinado	Costes del proveedor bajo un esquema coordinado				Ahorros o pérdidas	
			Coste fijo coordinado	Descuento en el precio del producto	Descuento en la tarifa de transporte	Suma		Total ⁽¹⁾
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
↑ Preferencia al coste ↓ Preferencia al nivel de servicio de transporte	1	54,000	26,500	23,606	13,473	63,579	50,106	7.2%
	2	54,000	26,500	23,606	13,473	63,579	50,106	7.2%
	3	54,000	26,500	23,606	13,473	63,579	50,106	7.2%
	4	54,000	26,400	23,700	13,495	63,596	50,100	7.2%
	5	54,000	26,500	23,606	13,473	63,579	50,106	7.2%
	6	54,000	26,400	23,700	13,495	63,596	50,100	7.2%
	7	54,000	26,400	23,700	13,495	63,596	50,100	7.2%
	8	54,000	26,400	23,700	13,495	63,596	50,100	7.2%
	9	54,000	26,250	23,759	13,885	63,894	50,009	7.4%
	10	54,000	25,450	24,632	14,747	64,828	50,082	7.3%
	11	54,000	24,250	26,514	17,289	68,053	50,764	6.0%
	12	54,000	22,600	30,521	22,166	75,287	53,121	1.6%
	13	54,000	20,850	36,316	30,975	88,141	57,166	-5.9%
	14	54,000	20,850	36,316	29,819	86,985	57,166	-5.9%
	15	54,000	20,850	36,319	28,952	86,121	57,169	-5.9%
	16	54,000	20,850	36,319	28,663	85,832	57,169	-5.9%
	17	54,000	20,850	36,316	28,230	85,396	57,166	-5.9%
	18	54,000	20,850	36,329	28,013	85,193	57,179	-5.9%
	19	54,000	20,850	36,339	28,013	85,202	57,189	-5.9%
	20	54,000	20,850	36,329	28,013	85,193	57,179	-5.9%
	21	54,000	20,850	36,359	28,013	85,222	57,209	-5.9%
	22	54,000	20,850	36,359	28,013	85,222	57,209	-5.9%
	23	54,000	20,850	36,452	28,013	85,315	57,302	-6.1%
	24	54,000	20,850	36,437	28,013	85,300	57,287	-6.1%
	25	54,000	21,200	36,313	28,013	85,526	57,513	-6.5%
	26	54,000	21,350	36,350	28,013	85,713	57,700	-6.9%
	27	54,000	21,300	36,526	28,013	85,840	57,826	-7.1%
	28	54,000	21,700	37,312	28,013	87,025	59,012	-9.3%

Nota: (1) No incluye el relacionado al descuento en la tarifa de transporte, debido a que este último se carga al transportista por negociaciones que realiza el proveedor.

Cabe señalar, que dichas pérdidas podrían ser más grandes aún si el proveedor también asume el coste por descuento en las tarifas de transporte; en este análisis se considera que dichos costes los asume un tercero (transportista) que proporciona el servicio, y que los beneficios los recibe directamente el cliente. En otras palabras, el

proveedor interviene como un negociador que aprovecha los volúmenes consolidados de carga para obtener mejores tarifas ante el transportista.

- e. En el caso de que el proveedor asumiera cabalmente los costes de transporte y los relacionados con el descuento en la tarifas, la curva de coste-nivel de servicio parece indicar una relación directa entre el nivel de servicio y el coste (véase figura 7.51). Sin embargo, debido a que los costes de transporte se transfieren al cliente y los descuentos, a un tercero (transportista), la curva de coste-nivel de servicio muestra que esta relación no es lineal (véase figura 7.52).

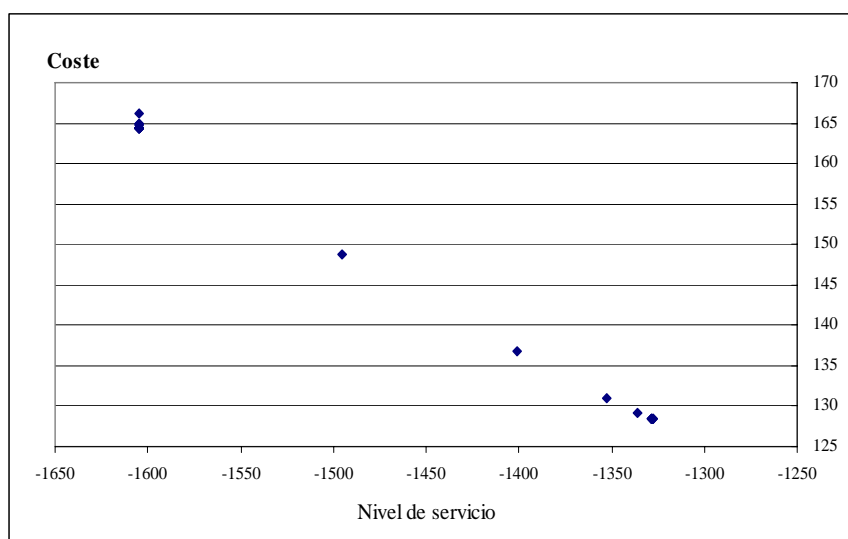


Figura 7.51
Soluciones no dominadas del proveedor coordinado bajo el *Incoterm* DDP (Incluye costes de transporte y descuento en las tarifas)

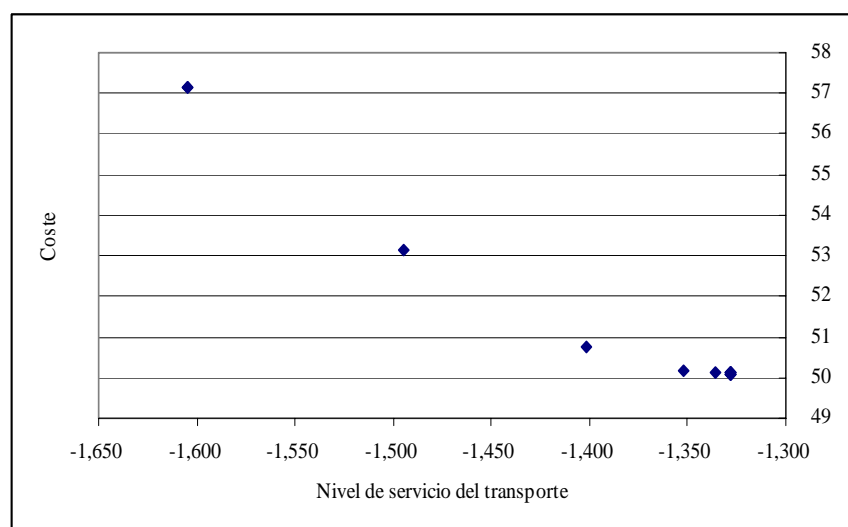


Figura 7.52
Soluciones no dominadas del proveedor coordinado bajo el *Incoterm* DDP (No incluye costes de transporte y descuento en la tarifas)

f. Por todo lo anterior, en este escenario la coordinación en un ambiente de negociación DDP resultó ser benéfica, tanto para el cliente como para el proveedor, sólo cuando el criterio está más orientado al coste. Nótese en el cuadro 7.36, cómo la diferencia en los costes entre estos dos contextos resulta poco significativa (véase también la figura 7.53), lo cual se refleja en ahorros del 6% al 10%. De igual manera, el nivel de servicio del transporte es muy similar, pero favorable para el sistema coordinado (véase la figura 7.54).

Cuadro 7.36
Coste total del sistema coordinado y nivel de servicio del transporte (Escenario 4)

Sol.	Coste total del sistema				Nivel de servicio del transporte			
	No coordinado	Coordinado	Diferencia	Ahorros o pérdidas	No coordinado	Coordinado	No coordinado	Coordinado
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
1	182,547	164,610	17,937	9.8%	-1,257,881	-1,327,986	6.89	8.07
2	182,547	164,610	17,937	9.8%	-1,257,881	-1,327,986	6.89	8.07
3	182,547	164,610	17,937	9.8%	-1,257,881	-1,327,986	6.89	8.07
4	182,547	164,675	17,872	9.8%	-1,257,881	-1,328,151	6.89	8.07
5	182,547	164,610	17,937	9.8%	-1,257,881	-1,327,986	6.89	8.07
6	182,547	164,675	17,872	9.8%	-1,257,881	-1,328,151	6.89	8.07
7	182,547	164,675	17,872	9.8%	-1,257,881	-1,328,151	6.89	8.07
8	182,547	164,675	17,872	9.8%	-1,257,881	-1,328,151	6.89	8.07
9	182,547	164,424	18,123	9.9%	-1,257,881	-1,335,671	6.89	8.12
10	182,547	164,353	18,194	10.0%	-1,257,881	-1,352,436	6.89	8.23
11	182,547	164,443	18,104	9.9%	-1,257,881	-1,401,312	6.89	8.52
12	182,547	166,373	16,174	8.9%	-1,257,881	-1,495,052	6.89	8.99
13	182,547	166,565	15,982	8.8%	-1,257,881	-1,604,674	6.89	9.63
14	182,547	167,721	14,826	8.1%	-1,257,881	-1,604,674	6.89	9.57
15	182,547	168,524	14,023	7.7%	-1,257,881	-1,604,674	6.89	9.52
16	182,547	168,813	13,734	7.5%	-1,257,881	-1,604,674	6.89	9.51
17	182,547	169,310	13,237	7.3%	-1,257,881	-1,604,674	6.89	9.48
18	182,547	169,991	12,556	6.9%	-1,257,881	-1,604,674	6.89	9.44
19	182,547	170,015	12,532	6.9%	-1,257,881	-1,604,674	6.89	9.44
20	182,547	169,991	12,556	6.9%	-1,257,881	-1,604,674	6.89	9.44
21	182,547	170,064	12,482	6.8%	-1,257,881	-1,604,674	6.89	9.44
22	182,547	170,064	12,482	6.8%	-1,257,881	-1,604,674	6.89	9.44
23	182,547	169,587	12,959	7.1%	-1,257,881	-1,604,674	6.89	9.46
24	182,547	169,580	12,967	7.1%	-1,257,881	-1,604,674	6.89	9.46
25	182,547	170,290	12,257	6.7%	-1,257,881	-1,604,674	6.89	9.42
26	182,547	170,378	12,169	6.7%	-1,257,881	-1,604,674	6.89	8.07
27	182,547	170,755	11,791	6.5%	-1,257,881	-1,604,674	6.89	9.40
28	182,547	171,174	11,373	6.2%	-1,257,881	-1,604,674	6.89	9.37

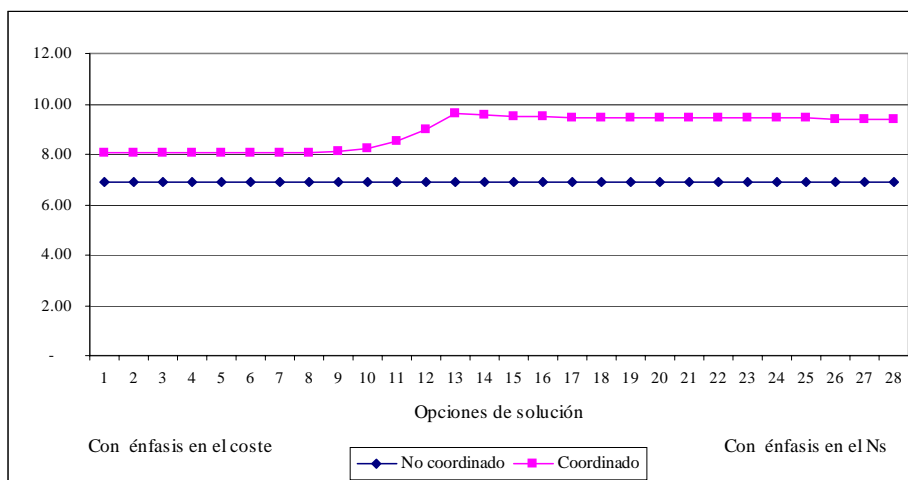


Figura 7.53
Índice de nivel de servicio del transporte con relación al coste

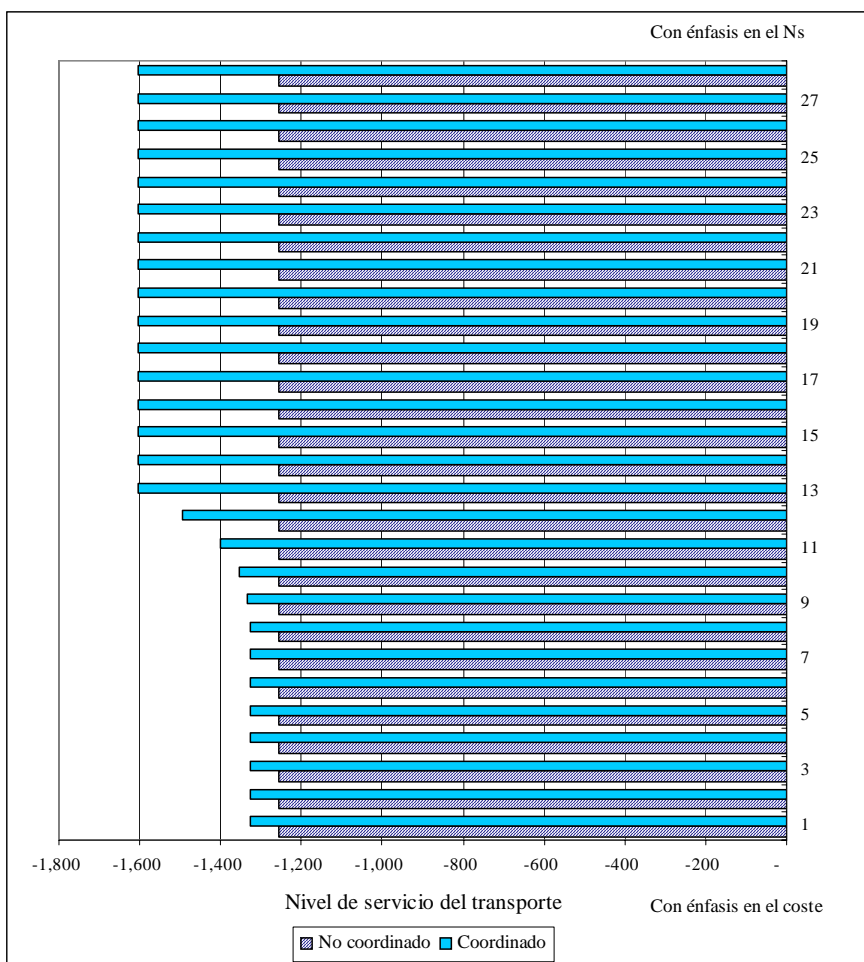


Figura 7.54
Nivel de servicio del transporte bajo el *Incoterm* DDP
(Comparación No coordinado variable vs coordinado variable)

7.5.5 Alternativas no dominadas. Escenario 5

Esta sección presenta los resultados que demuestran el efecto de la instrumentación de la estrategia ECR, específicamente bajo el término de comercio internacional DDP, en el contexto del escenario 5 de análisis. Los resultados, se presentan por separado para el cliente, proveedor y de manera conjunta (cliente-proveedor) desde el punto de vista de sistema. De esta manera, los incisos a continuación, resumen los resultados más relevantes.

- a. En el contexto DDP la coordinación ECR resultó más “económica” que un sistema no coordinado que tiene en cuenta los dos criterios modelados (coste-nivel de servicio del transporte). En efecto, la coordinación puede obtener ahorros entre el 9% y 39% en comparación con el sistema no coordinado que busca combinar los dos criterios considerados (véase figura 7.55 y cuadro 7.37). Esto se debe a que en esquema no coordinado, tanto el cliente como el proveedor, manejan un sistema para el control de inventarios del tipo lote por lote, incrementándose por ello los costes totales cuando el énfasis es el coste (véase figura 7.56).

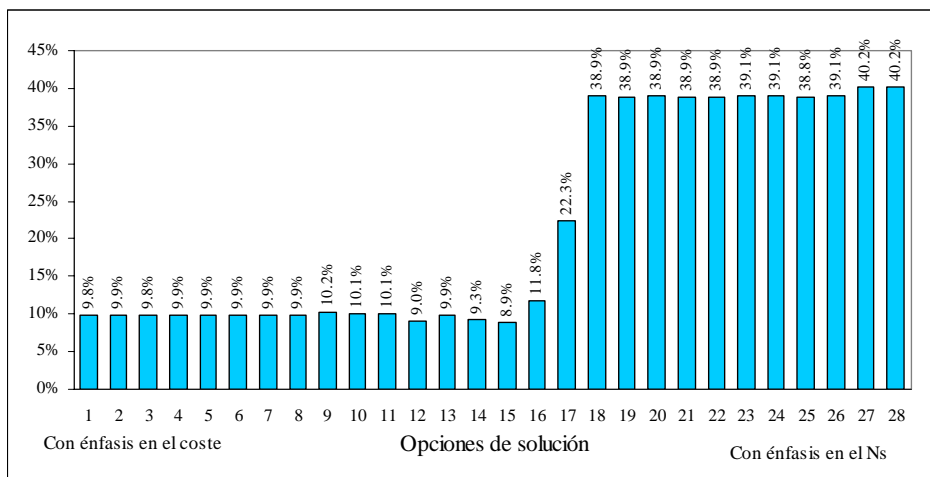


Figura 7.55
Ahorros del sistema

Cuadro 7.37
Coste total del sistema y nivel de servicio del transporte (Escenario 5)

Dirección	Sol.	Coste total del sistema			Nivel de servicio del transporte			
		No coordinado	Coordinado	Ahorros o pérdidas	Nivel de servicio no coordinado	Nivel de servicio coordinado	Índice de servicio no coordinado	Índice de servicio coordinado
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
↑ Preferencia al coste ↓ Preferencia al nivel de servicio de transporte	1	182,547	164,610	9.8%	-1,257,881	-1,327,986	6.89	8.07
	2	182,663	164,610	9.9%	-1,329,676	-1,327,986	7.28	8.07
	3	182,590	164,610	9.8%	-1,300,992	-1,327,986	7.13	8.07
	4	182,675	164,675	9.9%	-1,364,835	-1,328,151	7.47	8.07
	5	182,675	164,610	9.9%	-1,364,835	-1,327,986	7.47	8.07
	6	182,675	164,675	9.9%	-1,364,835	-1,328,151	7.47	8.07
	7	182,675	164,675	9.9%	-1,364,835	-1,328,151	7.47	8.07
	8	182,852	164,675	9.9%	-1,403,516	-1,328,151	7.68	8.07
	9	183,065	164,424	10.2%	-1,398,617	-1,335,671	7.64	8.12
	10	182,852	164,353	10.1%	-1,403,516	-1,352,436	7.68	8.23
	11	182,852	164,443	10.1%	-1,403,516	-1,401,312	7.68	8.52
	12	182,852	166,373	9.0%	-1,403,516	-1,495,052	7.68	8.99
	13	184,899	166,565	9.9%	-1,575,733	-1,604,674	8.52	9.63
	14	184,899	167,721	9.3%	-1,575,733	-1,604,674	8.52	9.57
	15	184,899	168,524	8.9%	-1,575,733	-1,604,674	8.52	9.52
	16	191,365	168,813	11.8%	-1,778,034	-1,604,674	9.29	9.51
	17	217,934	169,310	22.3%	-2,476,842	-1,604,674	11.37	9.48
	18	278,325	169,991	38.9%	-3,826,480	-1,604,674	13.75	9.44
	19	278,325	170,015	38.9%	-3,826,480	-1,604,674	13.75	9.44
	20	278,325	169,991	38.9%	-3,826,480	-1,604,674	13.75	9.44
	21	278,325	170,064	38.9%	-3,826,480	-1,604,674	13.75	9.44
	22	278,325	170,064	38.9%	-3,826,480	-1,604,674	13.75	9.44
	23	278,325	169,587	39.1%	-3,826,480	-1,604,674	13.75	9.46
	24	278,325	169,580	39.1%	-3,826,480	-1,604,674	13.75	9.46
	25	278,325	170,290	38.8%	-3,826,480	-1,604,674	13.75	9.42
	26	279,798	170,378	39.1%	-3,826,480	-1,604,674	13.68	9.42
	27	284,807	170,378	40.2%	-3,826,480	-1,604,674	13.44	9.42
	28	284,807	170,378	40.2%	-3,826,480	-1,604,674	13.44	9.42

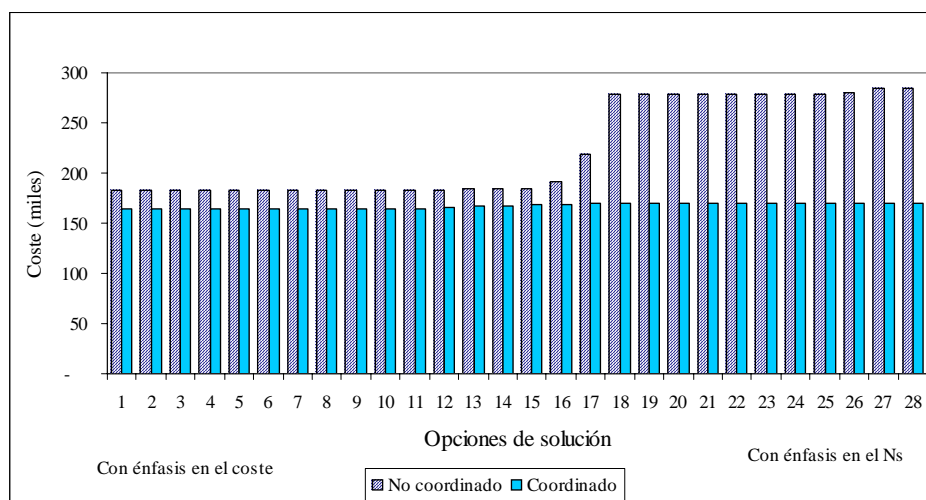


Figura 7.56
Coste total del sistema (miles)

- b. Los reportes sobre el tamaño del lote y el modo de transporte utilizado, muestran que en el sistema no coordinado se hace un uso intensivo de los modos más rápidos cuando se inclinan por dar mayor preferencia al nivel de servicio, combinando una política de lote por lote; por supuesto, esto provoca el mejor nivel del servicio, pero

el mayor coste del sistema. Para el caso coordinado, se presentan menores costes con el uso combinado de modos; evidentemente, esta situación hace que no se logre el mejor nivel de servicio de transporte, sin embargo, se consigue un mejor equilibrio entre los dos criterios considerados (véase cuadro 7.37). Las cifras en dicho cuadro, explican el comportamiento del nivel de servicio del transporte que se muestra en la figura 7.57.

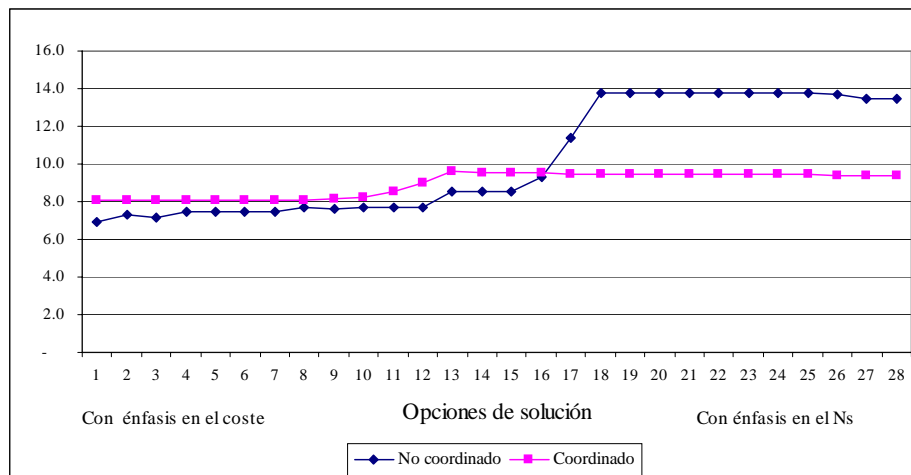


Figura 7.57
Índice de nivel de servicio del transporte

- c. Por lo que respecta al cliente, los beneficios derivados de la coordinación se encuentran entre el 11% y 50% en relación directa con el criterio de nivel de servicio (véase cuadro 7.38). En términos generales, en dicho cuadro se observa que los costes de transporte e inventario en tránsito son muy similares en magnitud con respecto al esquema no coordinado bajo el criterio coste, manteniéndose en un rango muy reducido de variación hasta alcanzar el máximo nivel de servicio de transporte. Bajo el esquema coordinado, el coste por ordenar se ve reducido a la mitad, mientras que el coste de inventario asciende notablemente; este último, se ve compensado por los descuentos en el precio de los productos y en la tarifa de transporte. Lo anterior, permite observar un equilibrio en la estructura de costes del cliente (véase cuadro 7.39).
- d. Contrario a los dos incisos anteriores, resulta que el proveedor obtiene ahorros sólo en el caso de que el criterio sea favorable al coste. Dichos ahorros son relativamente pequeños y no rebasan el 8%. Nuevamente, se observa que en el momento que el descuento en el precio de los productos es superior a los costes fijos, el proveedor incurre en pérdidas (véase cuadro 7.40).

Cuadro 7.38
Ahorros o pérdidas de cliente (Escenario 5)

Costes del cliente no coordinado						Coste del cliente coordinado							Diferencia	Ahorros o pérdidas
Ordenar	Inventario en almacén	Inventario en tránsito	Transporte	Total	Ordenar	Inventario	Inventario en tránsito	Transporte	Descuento en el precio del producto	Descuento en la tarifa de transporte	Total			
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)
1	10,441	-	57,448	60,657	128,547	6,591	26,417	53,707	64,869	23,606	13,473	114,504	14,043	10.9%
2	10,441	-	53,251	64,970	128,663	6,591	26,417	53,707	64,869	23,606	13,473	114,504	14,159	11.0%
3	10,441	-	54,902	63,247	128,590	6,591	26,417	53,707	64,869	23,606	13,473	114,504	14,086	11.0%
4	10,441	-	51,151	67,083	128,675	6,436	26,669	53,786	64,879	23,700	13,495	114,574	14,101	11.0%
5	10,441	-	51,151	67,083	128,675	6,591	26,417	53,707	64,869	23,606	13,473	114,504	14,171	11.0%
6	10,441	-	51,151	67,083	128,675	6,436	26,669	53,786	64,879	23,700	13,495	114,574	14,101	11.0%
7	10,441	-	51,151	67,083	128,675	6,436	26,669	53,786	64,879	23,700	13,495	114,574	14,101	11.0%
8	10,441	-	49,004	69,407	128,852	6,436	26,669	53,786	64,879	23,700	13,495	114,574	14,277	11.1%
9	10,441	-	49,512	69,112	129,065	6,661	26,501	53,627	65,270	23,759	13,885	114,415	14,651	11.4%
10	10,441	-	49,004	69,407	128,852	6,521	27,512	53,475	66,142	24,632	14,747	114,271	14,580	11.3%
11	10,441	-	49,004	69,407	128,852	6,751	29,164	52,883	68,685	26,514	17,289	113,679	15,172	11.8%
12	10,441	-	49,004	69,407	128,852	6,281	33,640	52,457	73,561	30,521	22,166	113,252	15,600	12.1%
13	10,441	-	40,705	79,753	130,899	5,666	40,057	51,702	79,264	36,316	30,975	109,399	21,500	16.4%
14	10,441	-	40,705	79,753	130,899	5,666	40,057	51,702	79,264	36,316	29,819	110,555	20,344	15.5%
15	10,441	-	40,705	79,753	130,899	5,666	40,061	51,636	79,264	36,319	28,952	111,355	19,543	14.9%
16	10,441	-	36,032	90,892	137,365	5,666	40,061	51,636	79,264	36,319	28,663	111,644	25,721	18.7%
17	10,441	-	24,642	128,851	163,934	5,666	40,057	51,702	79,264	36,316	28,230	112,144	51,790	31.6%
18	10,441	-	14,821	199,063	224,325	5,666	40,069	52,155	79,264	36,329	28,013	112,811	111,514	49.7%
19	10,441	-	14,821	199,063	224,325	5,666	40,079	52,169	79,264	36,339	28,013	112,826	111,499	49.7%
20	10,441	-	14,821	199,063	224,325	5,666	40,069	52,155	79,264	36,329	28,013	112,811	111,514	49.7%
21	10,441	-	14,821	199,063	224,325	5,666	40,102	52,195	79,264	36,359	28,013	112,855	111,470	49.7%
22	10,441	-	14,821	199,063	224,325	5,666	40,102	52,195	79,264	36,359	28,013	112,855	111,470	49.7%
23	10,441	-	14,821	199,063	224,325	5,666	40,196	51,624	79,264	36,452	28,013	112,285	112,040	49.9%
24	10,441	-	14,821	199,063	224,325	5,611	40,233	51,636	79,264	36,437	28,013	112,293	112,032	49.9%
25	10,441	-	14,821	199,063	224,325	5,666	40,052	52,121	79,264	36,313	28,013	112,776	111,549	49.7%
26	10,156	1,850	14,728	199,063	225,798	5,566	40,189	52,022	79,264	36,350	28,013	112,678	113,120	50.1%
27	9,406	8,004	14,334	199,063	230,807	5,751	40,182	52,271	79,264	36,526	28,013	112,929	117,878	51.1%
28	9,406	8,004	14,334	199,063	230,807	5,566	41,152	51,505	79,264	37,312	28,013	112,162	118,645	51.4%

- e. Cabe señalar que las diferencias de coste entre un ambiente coordinado contra el no coordinado por parte del proveedor, son menores que aquellas que logra el cliente. Esta situación hace que el sistema en su conjunto obtenga beneficios en todas las opciones evaluadas; dicho de otra forma, debido a que los ahorros del cliente son mucho más grandes que las pérdidas del proveedor, hace factible todas las opciones desde un punto de vista corporativista. Por lo anterior, una política que se podría adoptar es la reducción del 5% de descuento en el precio de los productos, como una medida de poder generar beneficios también para el proveedor para cualquier criterio que se enfatice.

Cuadro 7.39
Estructura de costes del cliente (Escenario 5)

Diferencia	Sol.	Ordenar	Inventario	Inventario en tránsito	Transporte	Total
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
↑ Preferencia al coste	1	4.3%	17.4%	35.4%	42.8%	100.0%
	2	4.3%	17.4%	35.4%	42.8%	100.0%
	3	4.3%	17.4%	35.4%z	42.8%	100.0%
	4	4.2%	17.6%	35.4%	42.7%	100.0%
	5	4.3%	17.4%	35.4%	42.8%	100.0%
	6	4.2%	17.6%	35.4%	42.7%	100.0%
	7	4.2%	17.6%	35.4%	42.7%	100.0%
	8	4.2%	17.6%	35.4%	42.7%	100.0%
	9	4.4%	17.4%	35.3%	42.9%	100.0%
	10	4.2%	17.9%	34.8%	43.0%	100.0%
	11	4.3%	18.5%	33.6%	43.6%	100.0%
	12	3.8%	20.3%	31.6%	44.3%	100.0%
	13	3.2%	22.7%	29.3%	44.9%	100.0%
	14	3.2%	22.7%	29.3%	44.9%	100.0%
	15	3.2%	22.7%	29.2%	44.9%	100.0%
	16	3.2%	22.7%	29.2%	44.9%	100.0%
	17	3.2%	22.7%	29.3%	44.9%	100.0%
	18	3.2%	22.6%	29.4%	44.7%	100.0%
	19	3.2%	22.6%	29.4%	44.7%	100.0%
	20	3.2%	22.6%	29.4%	44.7%	100.0%
	21	3.2%	22.6%	29.5%	44.7%	100.0%
	22	3.2%	22.6%	29.5%	44.7%	100.0%
	23	3.2%	22.7%	29.2%	44.8%	100.0%
	24	3.2%	22.8%	29.2%	44.8%	100.0%
	25	3.2%	22.6%	29.4%	44.8%	100.0%
	26	3.1%	22.7%	29.4%	44.8%	100.0%
	27	3.2%	22.6%	29.5%	44.7%	100.0%
	28	3.1%	23.2%	29.0%	44.7%	100.0%

Cuadro 7.40
Ahorros o pérdidas del proveedor (Escenario 5)

Dirección	Sol.	Coste fijo del proveedor no coordinado	Coste coordinado		Descuento en la tarifa del transporte	Total	Diferencia	Ahorros o pérdidas
			Coste fijo coordinado	Descuentos en el precio del producto				
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
Preferencia al coste ↑ ↓ Preferencia al nivel de servicio de transporte	1	54,000	26,500	23,606	13,473	50,106	3,894	7.2%
	2	54,000	26,500	23,606	13,473	50,106	3,894	7.2%
	3	54,000	26,500	23,606	13,473	50,106	3,894	7.2%
	4	54,000	26,400	23,700	13,495	50,100	3,900	7.2%
	5	54,000	26,500	23,606	13,473	50,106	3,894	7.2%
	6	54,000	26,400	23,700	13,495	50,100	3,900	7.2%
	7	54,000	26,400	23,700	13,495	50,100	3,900	7.2%
	8	54,000	26,400	23,700	13,495	50,100	3,900	7.2%
	9	54,000	26,250	23,759	13,885	50,009	3,991	7.4%
	10	54,000	25,450	24,632	14,747	50,082	3,918	7.3%
	11	54,000	24,250	26,514	17,289	50,764	3,236	6.0%
	12	54,000	22,600	30,521	22,166	53,121	879	1.6%
	13	54,000	20,850	36,316	30,975	57,166	-3,166	-5.9%
	14	54,000	20,850	36,316	29,819	57,166	-3,166	-5.9%
	15	54,000	20,850	36,319	28,952	57,169	-3,169	-5.9%
	16	54,000	20,850	36,319	28,663	57,169	-3,169	-5.9%
	17	54,000	20,850	36,316	28,230	57,166	-3,166	-5.9%
	18	54,000	20,850	36,329	28,013	57,179	-3,179	-5.9%
	19	54,000	20,850	36,339	28,013	57,189	-3,189	-5.9%
	20	54,000	20,850	36,329	28,013	57,179	-3,179	-5.9%
	21	54,000	20,850	36,359	28,013	57,209	-3,209	-5.9%
	22	54,000	20,850	36,359	28,013	57,209	-3,209	-5.9%
	23	54,000	20,850	36,452	28,013	57,302	-3,302	-6.1%
	24	54,000	20,850	36,437	28,013	57,287	-3,287	-6.1%
	25	54,000	21,200	36,313	28,013	57,513	-3,513	-6.5%
	26	54,000	21,350	36,350	28,013	57,700	-3,700	-6.9%
	27	54,000	21,350	36,350	28,013	57,700	-3,700	-6.9%
	28	54,000	21,350	36,350	28,013	57,700	-3,700	-6.9%

7.5.6 Alternativas no dominadas. Escenario 6

Esta sección presenta los resultados que demuestran el efecto de la instrumentación de la estrategia ECR, específicamente bajo el término de comercio internacional DDP, en el contexto del escenario 6 de análisis. Los resultados, se presentan por separado para el cliente, proveedor y de manera conjunta (cliente-proveedor) desde el punto de vista de sistema. De esta manera, los incisos a continuación, resumen los resultados más relevantes.

- a. Para el caso de un sistema no coordinado que basa su criterio en el nivel de servicio de transporte, se observa que los beneficios del sistema coordinado se acentúan cabalmente. Para el caso de estudio, se observa que en este escenario se podrían lograr ahorros en alrededor del 41% en promedio (véase figura 7.58). Esto se debe principalmente a que el sistema no coordinado, utilizando sólo el criterio del servicio de transporte, implica el uso de modos más “caros” (más rápidos), y por lo

tanto, mayores costes (véase cuadro 7.41). Sin embargo, el nivel de servicio de transporte en el sistema coordinado estaría por debajo del sistema no coordinado.

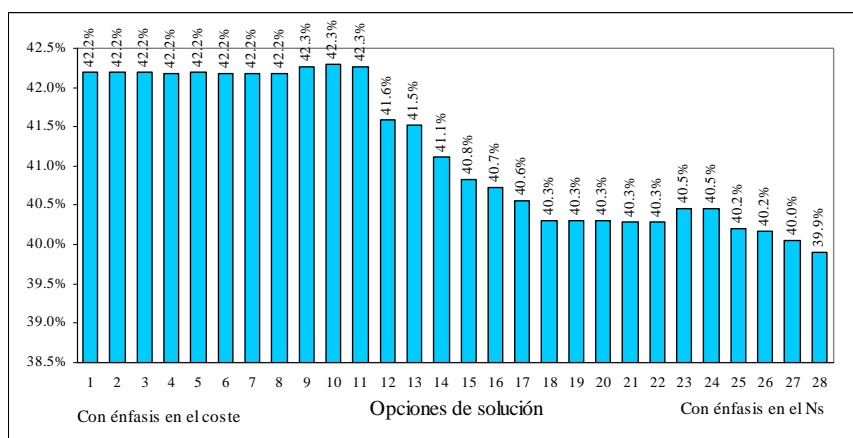


Figura 7.58
Ahorros del sistema

Cuadro 7.41
Coste total del sistema y nivel de servicio del transporte (Escenario 6)

Dirección	Sol.	Coste total de sistema				Nivel de servicio del transporte			
		No coordinado	Coordinado	Diferencia	Ahorros o pérdidas	No coordinado	Coordinado	No coordinado	Coordinado
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
↑ Preferencia al coste ↓ Preferencia al nivel de servicio de transporte	1	284,807	164,610	120,197	42.2%	-3,826,480	-1,327,986	13.44	8.07
	2	284,807	164,610	120,197	42.2%	-3,826,480	-1,327,986	13.44	8.07
	3	284,807	164,610	120,197	42.2%	-3,826,480	-1,327,986	13.44	8.07
	4	284,807	164,675	120,133	42.2%	-3,826,480	-1,328,151	13.44	8.07
	5	284,807	164,610	120,197	42.2%	-3,826,480	-1,327,986	13.44	8.07
	6	284,807	164,675	120,133	42.2%	-3,826,480	-1,328,151	13.44	8.07
	7	284,807	164,675	120,133	42.2%	-3,826,480	-1,328,151	13.44	8.07
	8	284,807	164,675	120,133	42.2%	-3,826,480	-1,328,151	13.44	8.07
	9	284,807	164,424	120,384	42.3%	-3,826,480	-1,335,671	13.44	8.12
	10	284,807	164,353	120,454	42.3%	-3,826,480	-1,352,436	13.44	8.23
	11	284,807	164,443	120,364	42.3%	-3,826,480	-1,401,312	13.44	8.52
	12	284,807	166,373	118,434	41.6%	-3,826,480	-1,495,052	13.44	8.99
	13	284,807	166,565	118,242	41.5%	-3,826,480	-1,604,674	13.44	9.63
	14	284,807	167,721	117,086	41.1%	-3,826,480	-1,604,674	13.44	9.57
	15	284,807	168,524	116,283	40.8%	-3,826,480	-1,604,674	13.44	9.52
	16	284,807	168,813	115,994	40.7%	-3,826,480	-1,604,674	13.44	9.51
	17	284,807	169,310	115,497	40.6%	-3,826,480	-1,604,674	13.44	9.48
	18	284,807	169,991	114,816	40.3%	-3,826,480	-1,604,674	13.44	9.44
	19	284,807	170,015	114,792	40.3%	-3,826,480	-1,604,674	13.44	9.44
	20	284,807	169,991	114,816	40.3%	-3,826,480	-1,604,674	13.44	9.44
	21	284,807	170,064	114,743	40.3%	-3,826,480	-1,604,674	13.44	9.44
	22	284,807	170,064	114,743	40.3%	-3,826,480	-1,604,674	13.44	9.44
	23	284,807	169,587	115,220	40.5%	-3,826,480	-1,604,674	13.44	9.46
	24	284,807	169,580	115,227	40.5%	-3,826,480	-1,604,674	13.44	9.46
	25	284,807	170,290	114,518	40.2%	-3,826,480	-1,604,674	13.44	9.42
	26	284,807	170,378	114,430	40.2%	-3,826,480	-1,604,674	13.44	9.42
	27	284,807	170,755	114,052	40.0%	-3,826,480	-1,604,674	13.44	9.40
	28	284,807	171,174	113,633	39.9%	-3,826,480	-1,604,674	13.44	9.37

- b. Por lo que respecta al criterio coste, la coordinación resulta benéfica para el cliente, debido a que le puede representar ahorros hasta del 50% en promedio para cada una de las opciones evaluadas (véase cuadro 7.42). Lo anterior, se debe fundamentalmente al mejor uso combinado de modos de transporte; complementándose con la reducción de envíos (costes por ordenar) y los descuentos en el precio de los productos y las tarifas de transporte.

Cuadro 7.42
Ahorro o pérdidas del cliente (Escenario 6)

Coste del cliente no coordinado	Costes del cliente				Descuento en el precio del producto	Descuento en la tarifa de transporte	Total	Diferencia	Ahorros o pérdidas	
	Ordenar	Inventario	Inventario en tránsito	Transporte						
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	
1	230,807	6,591	26,417	53,707	64,869	23,606	13,473	114,504	116,303	50.4%
2	230,807	6,591	26,417	53,707	64,869	23,606	13,473	114,504	116,303	50.4%
3	230,807	6,591	26,417	53,707	64,869	23,606	13,473	114,504	116,303	50.4%
4	230,807	6,436	26,669	53,786	64,879	23,700	13,495	114,574	116,233	50.4%
5	230,807	6,591	26,417	53,707	64,869	23,606	13,473	114,504	116,303	50.4%
6	230,807	6,436	26,669	53,786	64,879	23,700	13,495	114,574	116,233	50.4%
7	230,807	6,436	26,669	53,786	64,879	23,700	13,495	114,574	116,233	50.4%
8	230,807	6,436	26,669	53,786	64,879	23,700	13,495	114,574	116,233	50.4%
9	230,807	6,661	26,501	53,627	65,270	23,759	13,885	114,415	116,393	50.4%
10	230,807	6,521	27,512	53,475	66,142	24,632	14,747	114,271	116,536	50.5%
11	230,807	6,751	29,164	52,883	68,685	26,514	17,289	113,679	117,128	50.7%
12	230,807	6,281	33,640	52,457	73,561	30,521	22,166	113,252	117,555	50.9%
13	230,807	5,666	40,057	51,702	79,264	36,316	30,975	109,399	121,408	52.6%
14	230,807	5,666	40,057	51,702	79,264	36,316	29,819	110,555	120,252	52.1%
15	230,807	5,666	40,061	51,636	79,264	36,319	28,952	111,355	119,452	51.8%
16	230,807	5,666	40,061	51,636	79,264	36,319	28,663	111,644	119,163	51.6%
17	230,807	5,666	40,057	51,702	79,264	36,316	28,230	112,144	118,663	51.4%
18	230,807	5,666	40,069	52,155	79,264	36,329	28,013	112,811	117,996	51.1%
19	230,807	5,666	40,079	52,169	79,264	36,339	28,013	112,826	117,981	51.1%
20	230,807	5,666	40,069	52,155	79,264	36,329	28,013	112,811	117,996	51.1%
21	230,807	5,666	40,102	52,195	79,264	36,359	28,013	112,855	117,952	51.1%
22	230,807	5,666	40,102	52,195	79,264	36,359	28,013	112,855	117,952	51.1%
23	230,807	5,666	40,196	51,624	79,264	36,452	28,013	112,285	118,522	51.4%
24	230,807	5,611	40,233	51,636	79,264	36,437	28,013	112,293	118,514	51.3%
25	230,807	5,666	40,052	52,121	79,264	36,313	28,013	112,776	118,031	51.1%
26	230,807	5,566	40,189	52,022	79,264	36,350	28,013	112,678	118,129	51.2%
27	230,807	5,751	40,182	52,271	79,264	36,526	28,013	112,929	117,878	51.1%
28	230,807	5,566	41,152	51,505	79,264	37,312	28,013	112,162	118,645	51.4%

- c. Contrario a lo anterior, el proveedor presenta ahorros que se van reduciendo en la medida en que la dirección de la preferencia es el nivel de servicio de transporte en el contexto de un sistema coordinado (véase cuadro 7.43). Esto se debe principalmente a que el descuento en el precio de los productos se eleva considerablemente como consecuencia de mayores niveles de inventario en el cliente. En este sentido, la posibilidad de evitar descuentos generalizados en el precio de los productos o diversificar los mismos, o manejarse sobre la base de descuentos sólo en las tarifas de transporte, puede resultar benéfica la coordinación tanto para el cliente como para el proveedor.

Cuadro 7.43
Ahorros o pérdidas del proveedor (Escenario 6)

Dirección	Sol.	Coste fijo del proveedor No coordinado	Costes del proveedor coordinado			Descuento en la tarifa de Transporte	Diferencia	Ahorros o pérdidas
			Coste fijo	Descuento en el precio de los productos	Total			
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
↑ Preferencia al coste ↓ Preferencia al nivel de servicio de transporte	1	54,000	26,500	23,606	50,106	13,473	3,894	7.2%
	2	54,000	26,500	23,606	50,106	13,473	3,894	7.2%
	3	54,000	26,500	23,606	50,106	13,473	3,894	7.2%
	4	54,000	26,400	23,700	50,100	13,495	3,900	7.2%
	5	54,000	26,500	23,606	50,106	13,473	3,894	7.2%
	6	54,000	26,400	23,700	50,100	13,495	3,900	7.2%
	7	54,000	26,400	23,700	50,100	13,495	3,900	7.2%
	8	54,000	26,400	23,700	50,100	13,495	3,900	7.2%
	9	54,000	26,250	23,759	50,009	13,885	3,991	7.4%
	10	54,000	25,450	24,632	50,082	14,747	3,918	7.3%
	11	54,000	24,250	26,514	50,764	17,289	3,236	6.0%
	12	54,000	22,600	30,521	53,121	22,166	879	1.6%
	13	54,000	20,850	36,316	57,166	30,975	- 3,166	-5.9%
	14	54,000	20,850	36,316	57,166	29,819	- 3,166	-5.9%
	15	54,000	20,850	36,319	57,169	28,952	- 3,169	-5.9%
	16	54,000	20,850	36,319	57,169	28,663	- 3,169	-5.9%
	17	54,000	20,850	36,316	57,166	28,230	- 3,166	-5.9%
	18	54,000	20,850	36,329	57,179	28,013	- 3,179	-5.9%
	19	54,000	20,850	36,339	57,189	28,013	- 3,189	-5.9%
	20	54,000	20,850	36,329	57,179	28,013	- 3,179	-5.9%
	21	54,000	20,850	36,359	57,209	28,013	- 3,209	-5.9%
	22	54,000	20,850	36,359	57,209	28,013	- 3,209	-5.9%
	23	54,000	20,850	36,452	57,302	28,013	- 3,302	-6.1%
	24	54,000	20,850	36,437	57,287	28,013	- 3,287	-6.1%
	25	54,000	21,200	36,313	57,513	28,013	- 3,513	-6.5%
	26	54,000	21,350	36,350	57,700	28,013	- 3,700	-6.9%
	27	54,000	21,300	36,526	57,826	28,013	-3,826	-7.1%
	28	54,000	21,700	37,312	59,012	28,013	- 5,012	-9.3%

d. Por lo que respecta al servicio de transporte, de acuerdo con la figura 7.59, se observa que un sistema no coordinado, basado en el nivel de servicio del transporte, sin lugar a dudas estará por arriba del sistema coordinado en todas las opciones evaluadas. Esto último se debe a que el modelo busca minimizar el menor coste con la mejor combinación modal (mejor nivel de servicio), la cual, por supuesto no llegará al máximo nivel de servicio. En este caso en particular, se observa una relación aproximada casi de dos a uno las opciones con énfasis en el coste (véase figura 7.60).

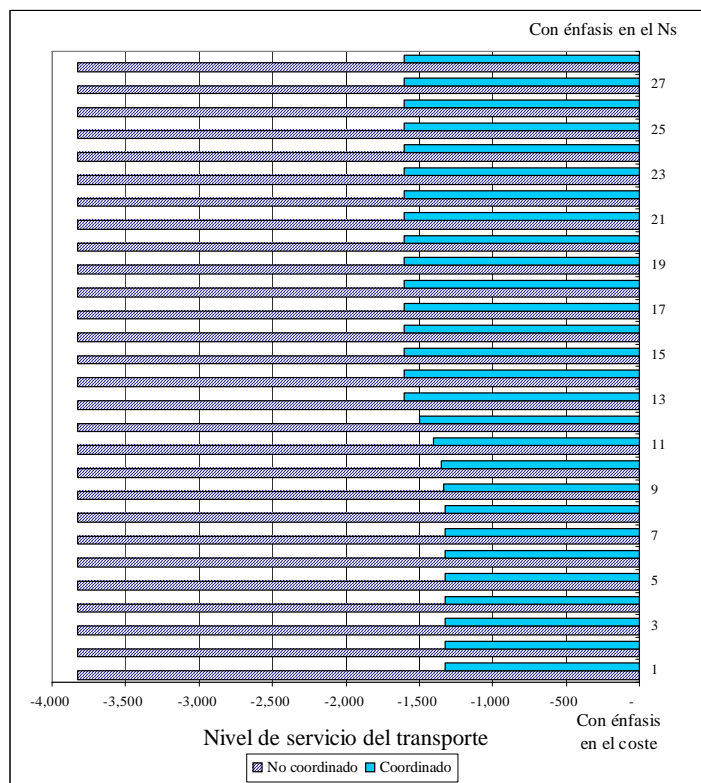


Figura 7.59
Nivel de servicio del transporte

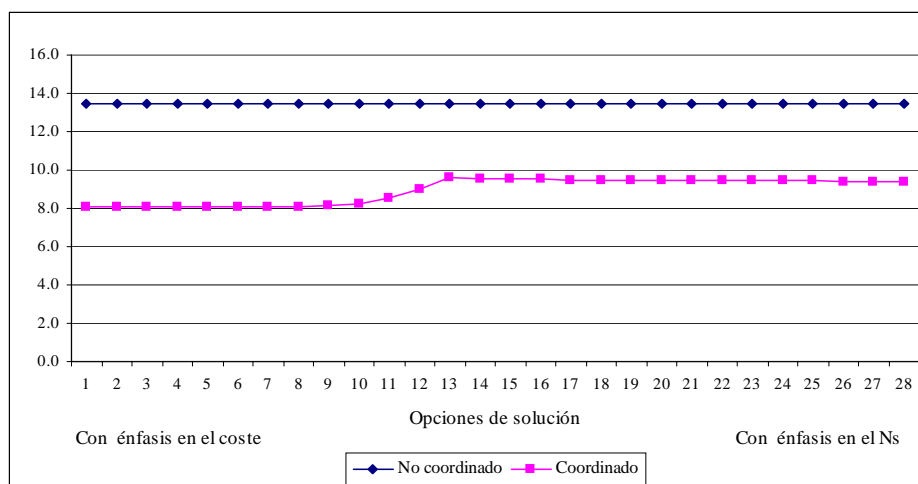


Figura 7.60
Índice de nivel de servicio del transporte

7.6 Uso combinado y costes del transporte por tipo de Incoterm

Con base en los resultados de los modelos, se observa que los costes de transporte parecen reflejar las condiciones de cada tipo de *Incoterm*, según la combinación de uso de los diferentes modos disponibles. El cuadro 7.44 presenta el coste de transporte por cada tipo de *Incoterm* o esquema de negociación.

Cuadro 7.44

Coste y nivel de servicio del transporte por tipo de Incoterm (Escenario 6)

Dirección	Sol.	No coordinado		Coordinado ExW		Coordinado DDP	
		Coste	Nivel de servicio	Coste	Nivel de servicio	Coste	Nivel de servicio
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
↑ Preferencia al coste ↓ Preferencia al nivel de servicio de transporte	1	60,657	-1,257,881	114,034	-2,226,740	64,868	-1,327,986
	2	64,970	-1,329,676	114,871	-2,242,517	64,868	-1,327,986
	3	63,247	-1,300,992	143,839	-2,768,514	64,868	-1,327,986
	4	67,083	-1,364,835	146,091	-2,811,809	64,878	-1,328,151
	5	67,083	-1,364,835	151,487	-2,914,812	64,868	-1,327,986
	6	67,083	-1,364,835	155,112	-2,984,485	64,878	-1,328,151
	7	67,083	-1,364,835	159,177	-3,062,017	64,878	-1,328,151
	8	69,407	-1,403,516	169,290	-3,255,402	64,878	-1,328,151
	9	69,112	-1,398,617	169,290	-3,255,402	65,269	-1,335,671
	10	69,407	-1,403,516	170,483	-3,277,481	66,142	-1,352,436
	11	69,407	-1,403,516	171,997	-3,307,005	68,684	-1,401,312
	12	69,407	-1,403,516	174,385	-3,352,112	73,561	-1,495,052
	13	79,753	-1,575,733	175,342	-3,370,511	79,264	-1,604,674
	14	79,753	-1,575,733	175,342	-3,370,511	79,264	-1,604,674
	15	79,753	-1,575,733	177,340	-3,408,923	79,264	-1,604,674
	16	90,892	-1,778,034	190,652	-3,664,811	79,264	-1,604,674
	17	-128,851	-2,476,842	194,417	-3,737,187	79,264	-1,604,674
	18	-199,063	-3,826,480	199,063	-3,826,480	79,264	-1,604,674
	19	-199,063	-3,826,480	199,063	-3,826,480	79,264	-1,604,674
	20	-199,063	-3,826,480	199,063	-3,826,480	79,264	-1,604,674
	21	-199,063	-3,826,480	199,063	-3,826,480	79,264	-1,604,674
	22	-199,063	-3,826,480	199,063	-3,826,480	79,264	-1,604,674
	23	-199,063	-3,826,480	199,063	-3,826,480	79,264	-1,604,674
	24	-199,063	-3,826,480	199,063	-3,826,480	79,264	-1,604,674
	25	-199,063	-3,826,480	199,063	-3,826,480	79,264	-1,604,674
	26	199,063	-3,826,480	199,063	-3,826,480	79,264	-1,604,674
	27	199,063	-3,826,480	199,063	-3,826,480	79,264	-1,604,674
	28	199,063	-3,826,480	199,063	-3,826,480	79,264	-1,604,674

A partir del cuadro 7.44, se advierte que los costes de transporte “no coordinado” y el “coordinado DDP”, presentan magnitudes similares cuando el criterio preferido es el coste. Sin embargo, en la medida que es más deseable el criterio de nivel de servicio, el esquema no coordinado manifiesta costes de transporte muy parecidos a los de la coordinación ExW (figura 7.61).

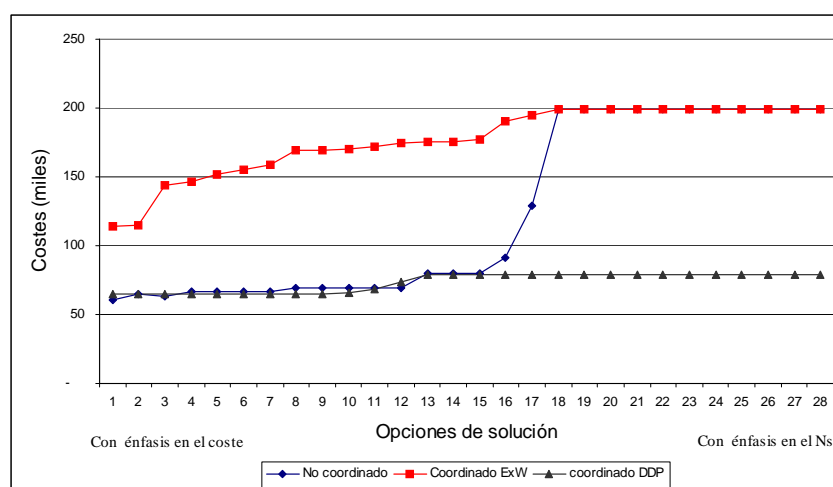


Figura 7.61
Costes de transporte por tipo de término de negociación

Específicamente, en un esquema no coordinado, el modelo parece simular adecuadamente el juicio de un tomador de decisiones que utiliza una política del tipo lote económico; por ejemplo, si el tomador de decisiones prefiere el criterio coste, el modelo asigna la mayor parte de los flujos de carga al modo más barato (lento), es decir, respeta el lanzamiento de pedidos más frecuentes y de igual tamaño (véase figuras 7.62 y 7.64); si se otorga mayor preferencia al nivel de servicio de transporte, el modelo asignará la carga al modo más rápido de la forma en que Wagner y Whitin (1958) establecen en su algoritmo, manteniendo en promedio el mismo tamaño de la orden, pero en algunos períodos la cantidad solicitada mostrará incrementos significativa para cumplir con la variación de la demanda (véase figura 7.63).

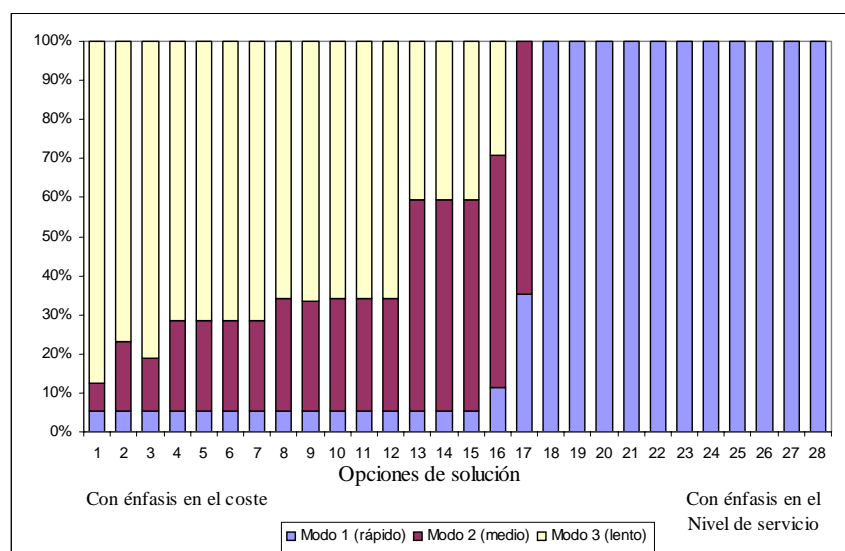


Figura 7.62
Reparto modal de la carga para un proceso no coordinado

En el contexto ExW, el modelo asume un reparto de la carga en proporciones muy similares para cada modo de transporte para el caso de que el énfasis sea el coste. La proporción asignada a modos más rápidos se observa en la medida que el criterio cambia a nivel de servicio. Esto se debe a que el modelo supone que el tomador de decisiones realiza lanzamientos de órdenes cada vez más grandes y con períodos más distantes (véase figura 7.64 y 7.65).

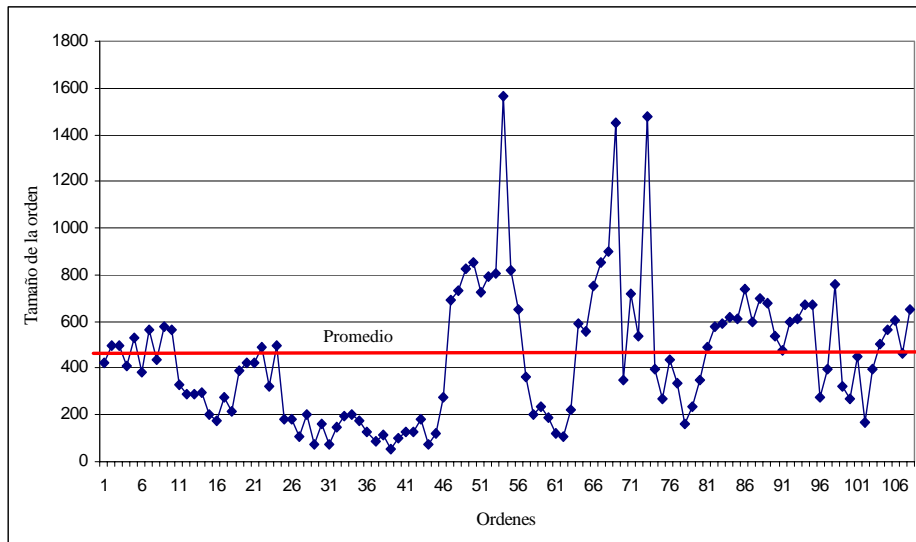


Figura 7.63
Asignación de la carga al modo más rápido otorgando mayor énfasis al nivel de servicio

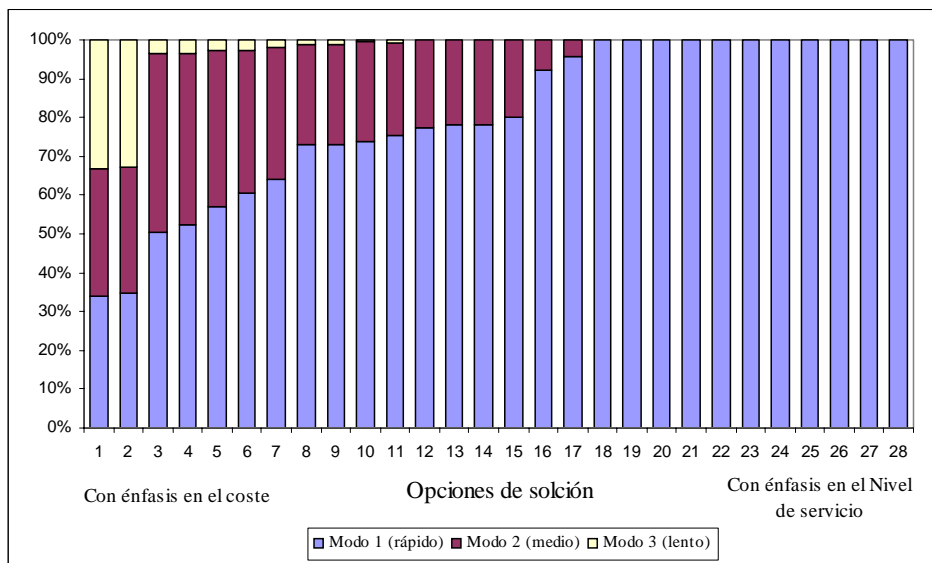


Figura 7.64
Reparto modal de la carga para un proceso coordinado ExW

En el contexto DDP, los costes crecen paulatinamente mostrándose muy por debajo de los otros dos esquemas de negociación (véase figura 7.61). Ya se dijo, que esto debe a la posibilidad de que el proveedor gestione una tarifa menor ante los transportistas, a cambio de generar economías de escalas con órdenes más grandes y prácticamente constantes (véase figura 7.65).

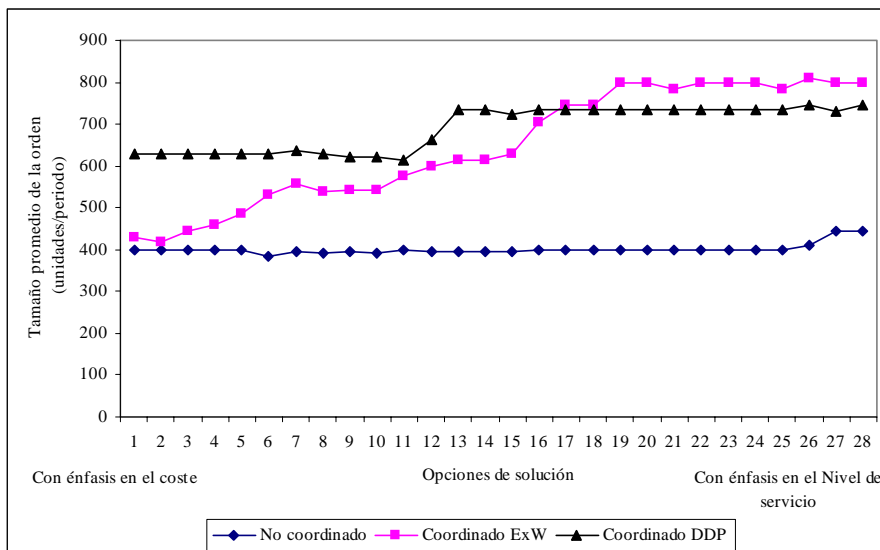


Figura 7.65
Tamaño de la orden por tipo de negociación

En cuanto al uso combinado de los modos de transporte involucrados, se observa que el modelo en el contexto DDP, combina principalmente los modos rápido y medio de acuerdo al criterio de preferencia elegido para lograr el menor coste y el mejor nivel de servicio. Por ejemplo, en la figura 7.66, se observa que una mayor preferencia en el coste el modelo asigna mayor carga en el modo medio; para el caso de que se otorgue mayor énfasis al nivel de servicio, se asigna mayor carga al modo rápido. Para el modo de transporte lento, prácticamente el modelo fija una cota similar para cada opción. Esto último, permite mantener cierto equilibrio y bajos costes de transporte.

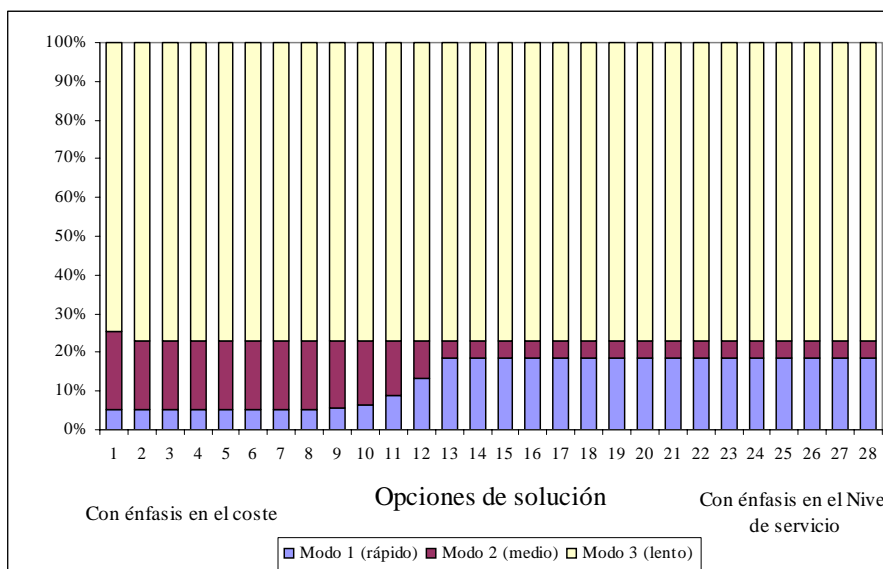


Figura 7.66
Reparto modal de la carga para un proceso coordinado DDP

7.7 Soluciones no dominadas creadas con el método interactivo de Vassilev y Narula

De acuerdo con el procedimiento metodológico propuesto en el capítulo 6, en esta sección se presentan los resultados de la segunda fase del modelado. En este caso, se asume que ninguna de las soluciones obtenidas con el método de los pesos ponderados es satisfactoria para el tomador de decisiones, por lo tanto, se tendrá que generar aquella que más se acerque a sus expectativas. Con la finalidad de comprender el procedimiento, en este apartado se ejemplifica el procedimiento de solución del método de Vassilev y Narula y se presentan los resultados logrados para el caso de los *Incoterms* ExW y DDP.

7.7.1 Operativa del método interactivo para encontrar soluciones no dominadas

De acuerdo con la metodología propuesta, corresponde utilizar el método de Dirección de Referencia para un Problema de Programación de Múltiples Objetivos Lineal Entero (MOILP) desarrollado por Vassilev y Narula (1993). Como ya fue indicado, este método implica la participación activa del tomador de decisiones. Su ventaja reside en que dicho método permite resolver los modelos propuestos de manera práctica y sencilla para obtener soluciones no dominadas a partir de los niveles de aspiración del tomador de decisiones. Su implementación no implica mayor complejidad a los modelos. Cada uno de los niveles de aspiración es proyectado a la región de factibilidad, y de manera particular a la frontera Pareto, tal y como se ejemplifica a continuación.

En la figura 7.67 sea F la frontera eficiente (línea delgada continúa) que contiene los puntos identificados con el método de los pesos ponderados (círculos no rellenos). A partir del análisis de dichas soluciones no dominadas, el proceso comienza cuando el tomador de decisiones selecciona una de éstas, por ejemplo, la solución 1: $F_1 = (f_1, f_2) = (5,4) = (x_1, x_2)$, es considerada como punto de referencia (solución inicial) para especificar sus preferencias.

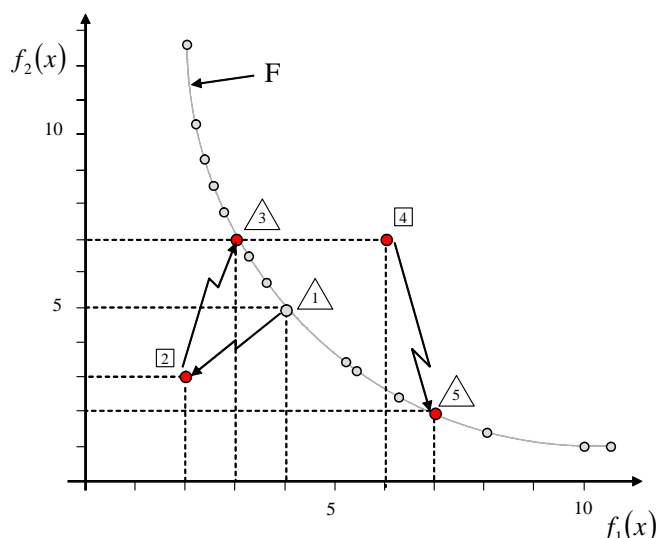


Figura 7.67
Frontera Pareto que contiene las soluciones no dominadas

Suponiendo que el tomador de decisiones pretende relajar ambos criterios $(f_1(x), f_2(x))$, proporciona la referencia $\bar{2}$: $F_2 = (f_1, f_2) = (2, 3)$, como vector de aspiración. Para encontrar la solución no dominada sobre la frontera Pareto, se resuelve el modelo matemático D (ya explicado en el capítulo 6).

$$\begin{aligned}
 \text{(D)} \quad & \max \left(y + \beta \sum_{k \in K} y_k \right) \\
 \text{sujeto a} \quad & f_k(x) - f_k = y_k, \quad k \in H \quad (7.11) \\
 & f_k(x) - f_k = -y_k, \quad k \in L \quad (7.12) \\
 & f_k(x) - (\bar{f}_k - f_k)y \geq \bar{f}_k, \quad k \in H \quad (7.13) \\
 & f_k(x) - (\bar{f}_k - f_k)\alpha \geq \bar{f}_k, \quad k \in L \quad (7.14) \\
 & f_k(x) = \bar{f}_k, \quad k \in E \quad (7.15) \\
 & x \in X \quad (7.16) \\
 & y, y_k \geq 0, \quad k \in K \quad (7.17)
 \end{aligned}$$

De esta aplicación se logra la solución 3, caracterizada como $(F_3 = (f_1, f_2) = (3, 7))$. Ahora, si el tomador de decisiones quisiera incrementar el valor de f_1 , propone $F_4 = (f_1, f_2) = (6, 7)$. Nuevamente se resuelve el modelo D y se obtiene la solución 5: $F_5 = (f_1, f_2) = (7, 2)$. Si el tomador de decisiones está satisfecho con la solución, el proceso se detiene; de otra manera, deberá proporcionar otro vector de aspiración.

7.7.2 Soluciones no dominadas reveladas con el método interactivo en el contexto de los incoterms ExW.

Utilizando el procedimiento anterior, los modelos propuestos en esta Tesis fueron utilizados para obtener un mayor número de soluciones a partir del nivel de aspiración del tomador de decisiones. Uno de los primeros comentarios que es justo decir, es que el método Vassilev y Narula (1993) se adaptó bastante bien a los modelos, logrando muy buenos resultados. Esto permitió corroborar que la metodología empleada es bastante aceptable para encontrar nuevas soluciones. En la figura 7.68, se presentan los resultados de este ejercicio para el modelo de coordinación ExW.

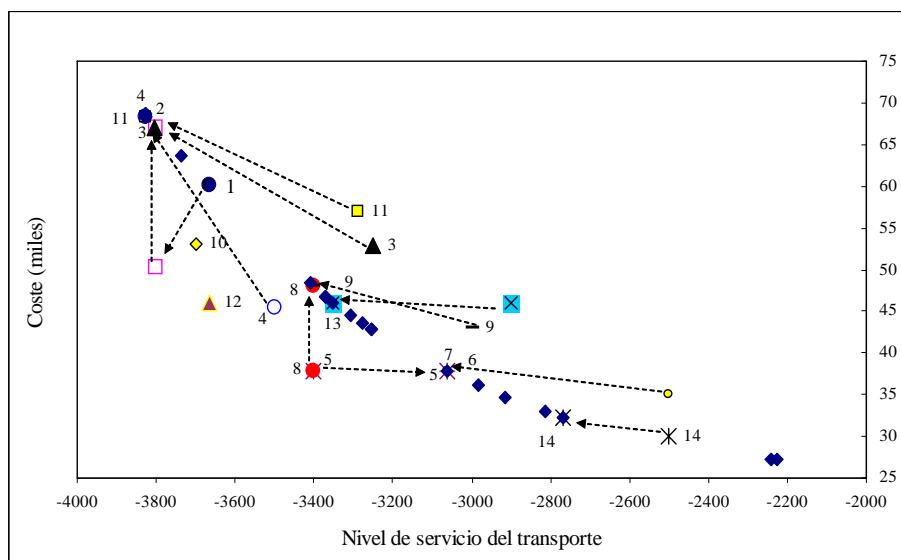


Figura 7.68
Soluciones no dominadas en el contexto ExW
generadas con el método de Vassilev y Narula

Como es evidente de este método, la figura 7.68 ilustra cómo son proyectados los vectores de aspiración del tomador de decisiones sobre la frontera Pareto y cómo es complementada con nuevas soluciones no dominadas, ampliando el rango de alternativas para la toma de decisiones sobre la frontera eficiente. En la figura, la solución inicial de referencia (punto 1), fue considerada para comenzar el proceso. Es decir, el TD toma de referencia el punto 1 con coordenadas (60107, -3664811) de coste y de nivel de servicio de transporte, respectivamente; a partir de esta cota, se aplica el proceso antes descrito, y se detiene hasta que TD queda satisfecho; en la figura, la solución 13 con coordenadas (46056, -3351767) de coste y nivel de servicio de transporte es aceptada, deteniéndose el proceso. En resumen, el TD ha decidido esta alternativa, la cual difiere de la original en 23% sobre el coste y 9% sobre el nivel de

servicio de transporte con respecto a la solución inicial. Por supuesto, en cada interacción, el tomador de decisiones va relajando uno u otro objetivo, según su punto de vista. De cualquier forma, cada nueva solución deberá ser evaluada con un procedimiento similar al presentado en la primera sección de este capítulo.

7.7.3 Soluciones no dominadas reveladas con el método interactivo en el contexto de los *incoterms* ExW y DDP.

Para el caso del modelo en el contexto DDP, se lograron los resultados correspondientes. En la figura 7.69, se observan la proyección de los vectores de aspiración del tomador de decisiones.

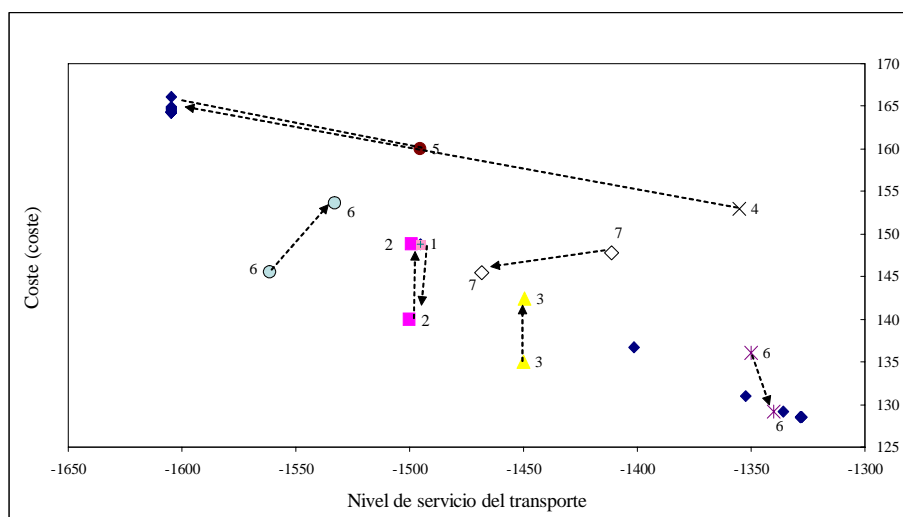


Figura 7.69
Soluciones no dominadas en el contexto DDP generadas con el método de Vassilev y Narula

En este caso se toma de referencia el punto 1, con coordenadas (148851, -1495052) de coste y de nivel de servicio de transporte, respectivamente; a partir de esta cota, se aplica el proceso antes descrito, y se detiene hasta que TD queda satisfecho; en la figura, la solución 7 con coordenadas (145032, -1463045) de coste y nivel de servicio de transporte es aceptada, deteniéndose el proceso. En resumen, el TD ha decidido esta alternativa, la cual difiere de la original en 2.6% sobre el coste y 2% sobre el nivel de servicio de transporte con respecto a la solución inicial, mostrándose muy conservador en este caso.

El procedimiento permite al TD a tener una mejor perspectiva del problema y tener la posibilidad de evaluar al mismo tiempo ambos objetivos. El procedimiento es fácil de implementar debido a que el análisis de los modelos cuenta con un adecuado

software y el centro de decisión no requiere de hacer algún procedimiento matemático, y solo juzgar las soluciones. Conviene señalar que las soluciones generadas con el método de Vassilve y Narula, también son obtenidas con el uso de los paquetes comerciales Lindo y Cplex.

7.8 Conclusiones

En este capítulo se han analizado los resultados obtenidos de la aplicación de los modelos propuestos al caso de una empresa de autopartes del sector de la automoción. El hecho de utilizar los datos específicos de una empresa, permiten evaluar los modelos y sus funcionamiento en un caso real. En función de los resultados, se corrobora que los modelos para la coordinación de inventarios, entre un cliente y un proveedor, simulan bastante bien el efecto de la interrelación que existe entre los objetivos estudiados y la conveniencia o no de utilizar la estrategia de coordinación ECR. Por supuesto, este comentario, en el fondo sugiere que es factible observar las diferentes perspectivas de solución y la conducta que podrían adoptar los centros de decisión.

En términos generales, la estructura de los modelos ha sido capaz de generar el conjunto de posibles soluciones que contemplan el intercambio (*tradeoff*) de los dos objetivos analizados, dando mayor visibilidad a la cadena de suministro en el contexto de la administración de los inventarios. Esto ha permitido, a su vez, la posibilidad de llevar a cabo la comparación de diversos escenarios de prueba que, en términos generales, han generado respuestas consistentes. Por ejemplo, los modelos permiten evaluar si un esquema coordinado es o no conveniente para el cliente y para el proveedor, e incluso para el sistema (cliente-proveedor), de acuerdo a los niveles de intercambio deseados (*tradeoff*) sobre el coste y el nivel de servicio de transporte.

Esto último, simplemente refleja que los modelos matemáticos generan soluciones no dominadas del problema en el contexto coordinado que pueden ser comparables contra las soluciones no dominadas de la política sin coordinación.

De esta manera, puede decirse que el objetivo de evaluar los beneficios económicos y del servicio de transporte combinado, obtenidos por el cliente y el proveedor, cuando asumen la estrategia de coordinación ECR, se ha podido cumplir a la luz de los resultados alcanzados. La consideración explícita de una demanda dinámica

establece que es factible llevar a cabo simulaciones para contextos más reales. Reyes y Gaytán, (2003), reportan que este factor es uno de los más relevantes para este tipo de problemas, pues aseguran que la variabilidad que presente la demanda se encuentra relacionada con la magnitud de los ahorros obtenidos.

Asimismo, se ha corroborado que el coste es un factor de decisión muy importante, pero también lo es el nivel de servicio de transporte. Debido a la aplicación multiobjetivo en los modelos propuestos, se ha podido confirmar que los beneficios no sólo pueden ser vistos desde una perspectiva simplista basada en el coste, sino también los resultados pueden ser evaluados teniendo en cuenta el efecto de combinar diferentes alternativas de transporte en un contexto coordinado. En el escenario 2, se detectó uno de los hallazgos más significativos de esta investigación, pues resulta que el cliente le conviene la coordinación de inventarios cuando se le otorgue mayor importancia al servicio de transporte, que al coste; por su parte, el proveedor aceptará una política de coordinación en la medida que un mejor servicio de transporte no le provoque que el descuento otorgado al cliente supere sus costes fijos.

Por lo anterior, se detectó que la decisión de coordinarse no sólo depende del coste, sino también de la importancia que se le otorgue al transporte; dicho de otra manera, se puede concluir que no sólo el tamaño del lote constituye un conflicto de intereses, sino también el nivel de servicio del transporte y la proporción de productos enviados por los diferentes modos utilizados.

En los casos extremos donde el decisor se inclina por algunos de los dos criterios analizados, es mucho más claro observar que el uso de la coordinación ECR es factible, ya que el cliente o proveedor, podrán estar en posibilidades de relajar algunos de los dos criterios y obtener mayores beneficios. Esto permitió comprobar la hipótesis de que es posible reducir los costes en el sistema cliente-proveedor al permitir el abasto de productos haciendo uso de diversos modos de transporte bajo la política ECR, con descuentos en las tarifas basados en los volúmenes transportados.

Adicionalmente al apoyo técnico para definir los beneficios económicos y de nivel de servicio de transporte, los modelos permiten centrar la discusión sobre la elección del tipo de negociación del comercio exterior (*Incoterms*) más convenientes para el cliente y el proveedor, desde su perspectiva específica. Así, la idea de poder analizar los

diferentes tipos de *Incoterms* existentes con modelos multicriterio, se convierte una manera novedosa de abordar el problema en el contexto del comercio internacional.

En concreto, los modelos construidos permiten identificar el efecto de la magnitud de los siguientes tipos de costes para el proveedor: *i*) por procesar (*set up*) y atender las ordenes lanzadas por el cliente; *ii*) descuento por excedentes de inventario y *iii*) descuento en la tarifa de transporte. Para el cliente se evalúan los costes por: *i*) lanzar las ordenes; *ii*) almacenamiento de productos; *iii*) inventario en tránsito; y *iv*) transporte. Al mismo tiempo los modelos determinan: el tamaño óptimo de la orden, el período de abasto, el nivel de inventario por período, el tamaño óptimo de la orden por modo de transporte, el nivel de servicio de transporte, y además, ayudan a definir el tipo de negociación o *Incoterm* más conveniente en el comercio internacional.

Por último, vale mencionar que los análisis desarrollados en este capítulo se consideran suficientes para demostrar la utilidad de los modelos, y que las conclusiones a las que se llegaron no pueden ser extensivas para el caso de considerarse valores diferentes para los parámetros del modelo propuesto; por lo tanto, no se omite señalar que dichos análisis pueden ser llevados a otros nivel de profundidad con fines de demostrar, por ejemplo, su versatilidad al considerar más eslabones en la cadena de abastecimiento, de tal manera que no sólo se incluya un proveedor y un cliente, sino también a los fabricantes y distribuidores “*río arriba*” o “*río abajo*”, y que además se encuentren en otras ubicaciones geográficas; medir la influencia de los parámetros que gobiernan los modelos, como es el caso de llevar a cabo procesos con variaciones en los costes por ordenar, costes por almacenar, diferentes tasas de descuento en el precio de los productos y en las tarifas de transporte, u otros; también, puede verse la posibilidad de evaluar de manera puntual, cuáles son los productos más convenientes para la coordinación ECR, ya que puede resultar que para algunos no sea rentable la coordinación. Viswanatan y Piplani (2001) lo han demostrado para el caso de los clientes, entre otras alterativas.

Referencias

1. (Beresford, 1999) Beresford, A.K.C. (1999). “Modelling Freight Transport Costs: A Case Study of the UK-Greece Corridors”. *International Journal of Logistics: Research and Applications*; vol. 2, num. 3, pp. 229-246.
2. (Brunnermeier y Martin, 1999) Brunnermeier, Smita B. y Martin, Sheila A (1999). “Interoperability Cost Analysis of the U.S. Automotive Supply Chain”. Research Triangle Institute Center for Economics Research. Research Triangle Park, NC 27709 (Final Report).

3. (Cplex, 2005) Solver Ilog Cplex, ver. 9.0; Ilog, Inc.
4. (Davis, 2005) Davis, Herbert W. (2005). "Logistics Costs and Service". Establish, Inc.
5. (Dell'Agnolo, 2006) Dell'Agnolo, Marco A. (2006). "Costos de inventarios, planificación de stocks y aprovisionamiento". Disponible en <http://www.gestiopolis.com/recursos/documentos/fulldocs/fin/planstock.htm>
6. (Fernández, *et al*, 2006) Fernández, S. Esteban, Avella, C. Lucía, y Fernández, B. Marta (2006). "Estrategia de producción". McGraw Hill. 2ª. Ed.
7. (García-Menéndez, *et al*, 2004) García-Menéndez L., I. Martínez-Zarzoso y D. Piñero-De Miguel (2004). "Determinants of Mode Choice (Road/Shipping) for Freight Transport: Evidence from Four Spanish Exporting Sectors", *Journal of Transport Economics and Policy* (aceptado y pendiente de publicación).
8. (Garrett J. y van Ryzin, 2001) Garrett J. y van Ryzin (2001) "Analyzing Inventory Cost and Service in Supply Chains". Columbia Business School. Disponible en: <http://www.columbia.edu/~gfv1/invnote4.PDF>.
9. (Jansson, 2000)) Jansson Molina, Axel (2000). "Formulación y Evaluación de Proyectos de Inversión". Ediciones Universidad Tecnológica Metropolitana, Santiago de Chile. ISBN: 956-7359-24-5.
10. (Jiménez y Hernández, 2002) Jiménez, S. J. Elías y Hernández, Salvador (2002). "Marco conceptual de la cadena de suministro: un nuevo enfoque logístico". Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica Núm. 215. (<http://www.imt.mx>)
11. (Lambert y Gardner, 1996) Lambert, Emmelhainz, M y Gardner, J. (1996) "Developing and Implementing Supply Chain Partnerships". *The International Journal of Logistics Management*; vol. 7, num. 2.
12. (Lamming, 1993) Lamming, Richard (1993). "Beyond Partnership Strategies for Innovation and Lean Supply". Prentice Hall Internatonal, UK.
13. (Langley, 1999) Langley, John (1999). "Evolución del concepto de logística", en Christopher, M. "Logística: Aspectos estratégicos". LIMUSA, 1999.
14. (Lindo, 2002) LINDO API User's Manual. Mathworks, Inc.
15. (Rey, 2001) Rey, María (2001). "Supply Chain Collaboration". Latin America Logistics Center, Atlanta, GA USA.
16. (Reyes y Gaytán, 2003) Reyes y Gaytán (2003). "La coordinación del abastecimiento a través de épocas comunes de resurtido, evaluando dos modos de transporte". Tesis presentada para obtener el grado de Maestro en Ciencias con la Especialidad en Sistemas de Calidad y Productividad. Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey, Campus Toluca.
17. (Silver, *et al*, 1998) Silver, E. A; Pike, D. F. y Peterson, R. (1998). "Inventory Management and Production Planning and Sheduling". Third Edition, John Wiley & Sons.
18. (van Eijs, 1994) van Eijs, M. J. G. (1994). "Multi-Item Inventory Systems with Joint Ordering and Transportation Decisions". *International Journal Production Economics*; vol. 35, pp. 285-292
19. (Vassilev y Narula, 1993) Vassilev, Vassil y Narula, Subhash (1993). "A Reference Direction Algorithm for Solving Multiple Objective Integer Linear Programming Problems". *The Journal of the Operational Research Society*, vol. 44, num. 12, pp. 1201-1209.
20. (Viswanathan y Piplani, 2001) Viswanathan, S. y Piplani, Rajesh (2001). "Coordinating Supply Chain Inventories through Common Replenishment Epochs". *European Journal of Operational Research*; vol. 129, pp. 277-286.
21. (Wagner y Whitin, 1958) Wagner, H. y Whitin, T.M. (1958). "Dynamic Version of the Economic Lot Size Model". *Management Science*; vol. 5, num. 1, pp. 89-96.

Capítulo 8

Conclusiones y líneas de futuro de investigación

8.1 Introducción

Se presentan las conclusiones y líneas de futuro de investigación detectadas a partir de la realización de los capítulos precedentes. Inicialmente se describe el marco teórico conceptual que dio origen a la idea específica para estudiar el tema de la coordinación de los inventarios entre un cliente y un proveedor, puntualizando las conclusiones de la problemática que rodea este importante tema en el contexto general de la cadena de suministro y la integración empresarial; posteriormente, se describen las conclusiones derivadas de los modelos propuestos para la coordinación de inventarios, tomando como referencia la problemática planteada. A partir de dichas conclusiones, se describen las contribuciones más significativas de los modelos propuestos y sus implicaciones al marco teórico. Al final de este capítulo, se presentan las limitaciones más relevantes encontradas en esta investigación, y algunas recomendaciones y líneas de futuro que pueden ser abordadas a partir de los hallazgos identificados durante el desarrollo de la presente tesis.

8.2 Conclusiones sobre el problema de la coordinación de los inventarios

En particular, el tema de la coordinación de los inventarios es una cuestión de “supervivencia” empresarial. Su estudio y puesta en práctica se ha convertido en una condición imperativa para agilizar y generar ventajas competitivas en la cadena de abastecimiento. Esto hace de la coordinación de los inventarios una cuestión fundamental en la gestión logística del proceso de suministro. En cierta forma, el desarrollo de novedosas estrategias relacionadas con el problema de inventarios y su coordinación, revisadas en el capítulo 2, permite observar que es un tema muy relevante que aun no ha sido resuelto del todo; la gran cantidad de fuentes y literatura científica encontrada sobre este tema, en cierta forma lo demuestran.

Teniendo en cuenta que la globalización ha dado origen a una mayor profundización en la división internacional del trabajo, culminando en un esquema fragmentado de la producción que demanda un alto nivel de coordinación en los

diferentes ámbitos inter-empresariales, y de acuerdo con la disertación de los esquemas de gestión, puede decirse que una primera conclusión general sobre la coordinación de los inventarios, es que su problemática no sólo radica en la determinación del tamaño económico de la orden y el período de abasto, sino que también involucra decisiones sobre las diferentes formas de transportar los productos a grandes distancias.

En este contexto, los análisis efectuados por Daganzo (1996) y Beresford (1999) y otros autores, demuestran que existe una relación intrínseca entre el sistema de inventarios y el transporte. De hecho, estos autores concretan aspectos muy importantes del marco teórico, los cuales establecen claramente que existe una influencia explícita del transporte en la administración de los inventarios. Con base en sus argumentos, se refuerza la idea de que el estudio conjunto de la coordinación de los inventarios y el transporte, es una tarea de vital importancia para poder atender la problemática que presenta la interrelación de las dos actividades más influyentes en los costes logísticos. Ciertamente, la consideración explícita del proceso de transporte en los modelos desarrollados en esta tesis para la coordinación de los inventarios, es sin duda un aspecto que permite distinguir con mayor claridad el impacto en los costes de la gestión logística.

En general, y como puede observarse en el capítulo 3, los científicos buscan dar respuesta a problemas de inventarios cada vez más complejos, que involucran un mayor número de factores, entre ellos las variables fundamentales del transporte. Sin embargo, a pesar de la evolución reciente de los modelos diseñados para atender este problema, se ha podido identificar que los cuadros de investigación aún permanecen inconclusos. No obstante, de acuerdo con la investigación bibliográfica, el interés por el estudio conjunto de los inventarios y el transporte ha venido creciendo bajo diferentes perspectivas de análisis. Esto último puede resultar evidente dada la gran cantidad de fenómenos y combinación de factores, derivado de la integración empresarial que se está presentando a escala mundial.

Justamente, el tema de la gestión de la cadena de suministro y la integración empresarial, se ha convertido en un estigma en diferentes sectores industriales y en las universidades más importantes del mundo. Son muy diversos los temas que se abordan para atender esta gran visión, y uno de los más importantes es el de la gestión de los inventarios. Específicamente, como se demuestra en el capítulo 4, el sector de la

automoción es uno de los principales sectores industriales que han detonado los nuevos paradigmas de la gestión de la cadena de suministro, y de manera especial, de los inventarios. Por la gran fragmentación de sus actividades industriales, el sector de la automoción exige importantes esfuerzos en la administración de sus procesos del suministro de componentes para optimizar su disponibilidad, sin aumentar los costes de inventarios y de transporte.

Particularmente, en el sector de la automoción, el tema de la administración de los inventarios ha sido la piedra angular bajo la cual se han desarrollado los esquemas más innovadores de gestión. Sin embargo, de acuerdo con la investigación de las características de este sector, puede concluirse que ciertos eslabones de la cadena de suministro aún no gozan de la implementación de las estrategias más adecuadas para coordinar sus inventarios.

Al respecto, el problema de los inventarios en el sector de la automoción, reside principalmente en que la empresa fabricantes de automóviles y sus proveedores más cercanos, tratan de optimizar individualmente sus beneficios por medio del establecimiento de políticas muy rígidas de gestión, abandonando, sobre todo, a las pequeñas y medianas empresas de este sector, las cuales generalmente se encuentran alejadas y que absorben altos costes de inventarios y de transporte. Dicha problemática se complica mayormente cuando el tomador de decisiones no posee los instrumentos necesarios y una visión más amplia para resolver los problemas de abastecimiento y distribución, llevando sus decisiones bajo supuestos sin sustento, y basadas en enfoques limitados al coste mínimo. En general, las diferentes alternativas para transportar las autopartes, generalmente no son consideradas por el tomador de decisiones como un asunto estratégico, a partir del cual puedan generar ventajas competitivas en función del conocimiento explícito de los diferentes atributos y niveles de servicio de los modos disponibles.

En definitiva, a partir de los resultados obtenidos de la investigación global, puede concluirse que el vínculo entre los inventarios y el transporte de los componentes en el sector de la automoción, puede ser considerado para dictar la política de inventario que deben asumir conjuntamente las empresas que intervienen, en torno al tamaño del pedido y el período de suministro, de acuerdo a las características del modo de transporte que se emplee, considerando además el entorno internacional.

Por todo lo anterior, el hecho de apoyar la idea de asumir la estrategia ECR como un mecanismo de coordinación entre clientes y proveedores, ha resultado una buena opción para casos como el analizado en esta tesis, para administrar los inventarios, y al mismo tiempo, gestionar el transporte. En cierta forma, la aplicación de los modelos propuestos para resolver la problemática antes señalada, permite deducir que los resultados obtenidos brindan una clara visión de su utilización en los eslabones de la cadena de suministro del sector de la automoción con dificultades para implementar otro tipo de estrategias, incluida la de *justo a tiempo*.

8.3 Conclusiones acerca de las preguntas de investigación o hipótesis

Por lo que respecta a las preguntas de investigación, en esta sección se presentan las conclusiones más pertinentes que responden a los cuestionamientos que dieron origen a la presente tesis.

8.3.1 Pregunta de investigación 1

¿Bajo que condiciones del coste total de la gestión de inventarios y nivel de servicio de transporte deben los clientes y proveedores tomar la decisión de aceptar la estrategia de coordinación ECR?

Con relación a esta pregunta de investigación, los resultados que arrojaron los modelos han permitido visualizar diferentes estados en función del coste y del nivel de servicio de transporte, por medio de los cuales es factible evaluar y tomar la decisión de coordinarse o no. Por ejemplo, a partir de la frontera de eficiencia en la sección 7.4.4, el comprador puede elegir aquella política de inventarios que corresponde a la combinación (costes, tiempo de entrega) que más le satisfaga.

En el contexto ExW coordinado, se han identificado que las soluciones no dominadas encontradas en este ámbito de negociación, son claramente superadas por las soluciones de la frontera no dominada de la política sin coordinación; en otras palabras, la instrumentación de la estrategia ECR no es conveniente para el cliente, cuando éste toma decisiones sobre la base de ambos criterios (coste y nivel de servicio); a partir de dicha situación, la condicionante principal para que el cliente tome la decisión de coordinarse, estará en función de que la solución en ese contexto, sean igual o mejor en por lo menos alguno de los dos criterios.

Similares resultados se encontraron cuando se utiliza el *Incoterm* DDP. Sin embargo, en este caso, los resultados obtenidos indican que la coordinación ECR se facilita bajo el *Incoterm* DDP, siempre y cuando el proveedor reduzca los costes fijos y costes de envío lo más bajo posible, para estar en posición de otorgar un mayor descuento en los productos. Para el *Incoterm* DDP se deben registrar además tamaños de lote más grandes y menores costes de transporte, a través de la consolidación de envíos de diferentes clientes con los que interactúa (incluidos los no coordinados).

Los resultados de la coordinación ofrecer importantes beneficios al cliente para diferentes tasas de descuento en los fletes según la preferencia por los criterios. Para el caso de estudio, dichas tasas oscilaron entre 0.9% y 17.6%, desde una mayor preferencia por el coste, hasta una preferencia por el tiempo de entrega (nivel de servicio de transporte).

Por otro lado, se observó que a medida que se otorga mayor importancia al tiempo de entrega, los costes de transporte para el esquema no coordinado se acercan a los costes de la política de coordinación ExW. Este resultado reveló que la decisión de coordinarse no sólo depende del coste, sino también de la importancia que se le otorgue al tiempo de entrega el cual a su vez depende del modo de transporte elegido.

Particularmente, en la sección 7.5.2, destaca el hecho de que el proveedor aceptará una política de coordinación en la medida que un mejor servicio de transporte no le provoque que el descuento otorgado al cliente supere sus costes fijos. Por lo anterior, se detectó que la decisión de coordinarse no sólo depende del coste, sino también de la importancia que se le otorgue al transporte; dicho de otra manera, se puede concluir que no sólo el tamaño del lote constituye un conflicto de intereses, sino también el nivel de servicio del transporte y la proporción de productos enviados por los diferentes modos utilizados.

A la luz de los resultados antes expuestos, es evidente que esta pregunta de investigación no tiene una respuesta directa, ya que la decisión de coordinarse o no, depende de un mayor número de variables que deben ser analizadas de manera conjunta con el fin de conforman las condiciones suficientes para tomar la decisión más adecuada. En tal virtud, se corrobora que la visión basada sólo en el coste, no es una condición suficiente para tomar resoluciones, en este caso, haciendo uso de criterios adicionales como el nivel de servicio de transporte, se amplía el horizonte de decisión.

8.3.2 Pregunta de investigación 2

¿Cómo de efectiva puede resultar la práctica de la coordinación de inventarios utilizando la estrategia ECR en una cadena de suministro para ayudar al proveedor a negociar sobre la base de los términos del comercio internacional ExW y DDP?

De acuerdo con los resultados obtenidos por los modelos, se observó que los datos reflejan con bastante aproximación el ambiente que priva en los escenarios de coordinación ExW y DDP. Por ejemplo, en la sección 7.5.4, sobre la base de estos dos tipos de negociación, el proveedor podrá demostrar a su cliente que en un ambiente coordinado DDP, los costes por ordenar le serán menores con relación a un enfoque ExW, y que el descuento en el precio de los productos y en las tarifas de transporte, le compensará los costes de inventario en los que incurre si acepta la estrategia.

Sobre esta misma base, el proveedor estará en posibilidades de observar el nivel de ahorros que le produce cada término de negociación, de acuerdo a la importancia otorgada a cada uno de los criterios analizados. Para tratar de ser más explícitos, en esa misma sección se observa que en la negociación ExW, el proveedor logrará ahorros significativos (cercaos al 50%, con relación a la opción no coordinada) cuando otorga mayor énfasis en el coste; mientras que en el *Incoterm* DDP, sus beneficios se verán substancialmente reducidos (cercaos al 7%); ante esta situación, es claro observar que el proveedor puede tener más claridad sobre la disyuntiva de negociar sobre uno u otro tipo de *Incoterm*.

En conclusión, desde el punto de vista analítico, los modelos entregan la información suficiente para ayudar a realizar las comparaciones necesarias para la toma de decisiones, sin embargo, no se deja de reconocer que las simplificaciones a las que se someten este tipo de esquemas podrían dejar fuera una serie de circunstancias que no dependen de la formulación, así por ejemplo, para el caso señalado del proveedor, éste podría aceptar la negociación DDP sacrificando sus beneficios por la conveniencia de mantener un cliente con el que mantiene muy buenas relaciones comerciales; o simplemente fomentar una política para captar un mayor número de clientes, entre otras.

8.3.3 Pregunta de investigación 3

¿Es posible reducir los costes en el sistema cliente-proveedor al permitir el abasto de productos haciendo uso de diversos modos de transporte bajo la estrategia ECR?

Como se dijo desde un principio (capítulo 1), es común que los proveedores utilicen diversos modos de transporte para enviar productos a sus clientes. Sin embargo normalmente esta práctica se ha basado sólo en la urgencia del envío y sin usar algún análisis técnico. En este sentido, la utilización de los modelos propuestos permite observar técnicamente el efecto en los costes totales del sistema por utilizar diverso modos de transporte.

Para el caso de estudio en esta tesis, los resultados mostraron que no sólo puede verse una reducción de los costes, sino que incluso, se visualiza bajo qué condiciones dicha reducción se presenta cuando se instrumenta la estrategia ECR. Por ejemplo, en la sección 7.5.1 se observa que en el contexto ExW, cuando el cliente acude a la planta del proveedor y tiene preferencia por lograr el menor coste (es decir, que utiliza modos de transporte con tiempos de entrega más grandes), la coordinación no es benéfica para el sistema debido a que en este estado, el cliente deberá cambiar su punto de vista hacia el uso de transportes con mejores tiempo de entrega con el consiguiente inconveniente de un coste más alto. Por este hecho, las pérdidas del cliente superan los beneficios del proveedor, provocando que el sistema no muestre una reducción del coste. No obstante, en este mismo contexto (ExW), pero con énfasis en el nivel de servicio (escenario 3), se logra la reducción de los costes para el sistema en su conjunto (cliente-proveedor), a pesar de que el proveedor manifiesta cierto nivel de pérdidas en un situación coordinada, cuando el énfasis va cambiando de coste a nivel de servicio. Para el caso del *Incoterm* DDP, todos los escenarios obtuvieron reducciones en coste.

A la luz de estos resultados, se puede concluir que la coordinación ECR no garantiza la reducción de los costes totales en el sistema para todos los casos. En tal virtud, conocer si es posible reducir los costes en el sistema cliente-proveedor, haciendo uso de diversos modos de transporte bajo la estrategia ECR, nuevamente se considera que no es una respuesta sencilla, en todo caso, aquí también se requerirá establecer bajo qué condiciones esto se cumple.

8.3.4 Pregunta de investigación 4

Al hacer uso de diversos modos y de la estrategia ECR, ¿Es posible lograr beneficios en coste en el sistema cliente-proveedor considerando descuentos en el precio de los productos y en las tarifas de transporte que considere los volúmenes transportados?

Con relación a esta pregunta de investigación, puede mencionarse que parte de ella ha sido respondida en los comentarios anteriores, en el sentido de que se lograran beneficios en el sistema según las condiciones prevalecientes; sin embargo, es importante destacar que la influencia de los descuentos en el precio de los productos y en las tarifas de transporte involucra más al proveedor que al cliente, principalmente en el contexto del *Incoterm* DDP. Esto se debe a que en un ambiente de negociación (ExW o DDP), el descuento en el precio del producto representa un coste al proveedor, mientras que al cliente le significa un ahorro, siempre y cuando el coste del sobre inventario por aceptar la estrategia ECR, no rebase dicho descuento. De manera particular, los resultados arrojaron que el proveedor obtendrá beneficios de la coordinación siempre y cuando sus costes fijos no se vean superados por los descuentos, en la medida que se prefiere mejores tiempos de entrega. Para el caso de los descuentos en las tarifas de transporte (*Incoterm* DDP), se observó que el más beneficiado será el cliente, porque aprovechará la negociación por volúmenes que lleva a cabo el proveedor ante los transportistas.

8.4 Implicaciones para la teoría

La consideración explícita de diferentes modos de transporte en la coordinación de inventarios, es sin lugar a dudas un aspecto que permite distinguir con mayor claridad el impacto de su nivel de servicio en la política de abasto. Paulatinamente, el interés por el estudio conjunto de estas dos actividades (transporte e inventarios) ha venido creciendo bajo diferentes perspectivas de análisis. Sin embargo, a partir de la revisión realizada a la literatura puede concluirse que este fenómeno no ha sido estudiado desde la óptica de este trabajo de investigación.

En efecto, la coordinación de inventarios desde la perspectiva multicriterio se considera que es novedosa debido a que la decisión de coordinarse no se basa en un sólo

criterio (coste), como lo hacen la mayoría de los trabajos que tratan el tema, sino que permite tomar en cuenta otro criterio de gestión. Esto hace que el tema sea relevante debido a la complejidad que representa la toma de decisiones sobre la combinación de factores cuantitativos y cualitativos, desde un punto de vista multicriterio.

Los resultados obtenidos del modelo avalan lo anterior, ya que permiten evaluar el impacto del nivel de servicio de transporte en las decisiones sobre el tamaño de la orden, el período de abasto, el modo de transporte a utilizar, y por supuesto, en el coste total. La evidencia reflejada en las fronteras eficientes analizadas, así lo confirman. Por todo lo anterior, puede concluirse que la formulación de los modelos desarrollados en el capítulo 5, que consideran la participación explícita del transporte como factor fundamental en la gestión coordinada de los inventarios, es una aportación directa al conocimiento dada la forma novedosa de tratar el tema.

8.5 Implicaciones para las políticas y prácticas

Modelos como los propuestos en esta tesis, permiten demostrar que la estrategia ECR pertenece al ámbito de las “mejores prácticas”, y que es una herramienta de gestión muy valiosa para definir las políticas de operación. Para el caso específico analizado, se ha probado que la estrategia de coordinación de inventarios ECR representa una opción más para aquellas empresas de los eslabones más alejados de las compañías ensambladoras de automóviles que no pueden implementar la estrategia *justo a tiempo*. Es más, ambas prácticas de gestión pueden ejercer su filosofía en la medida de que los tomadores de decisiones aprendan a combinarlas.

Por otro lado, de acuerdo a los resultados obtenidos, puede establecerse que el hecho de aplicar los modelos a un caso en particular, prueba de alguna manera que es factible su aplicación a un mayor número de casos con la adecuación de sus respectivos parámetros, e incluso, extenderlo a otros sectores industriales. Sin embargo, una dificultad importante puede estar relacionada con la disponibilidad de la información, ya que es común que las empresas no dispongan de los datos tal y como lo demandan los modelos propuestos. Es conveniente tener en cuenta que el modelado de ciertos escenarios será mejor mientras más se apeguen a la realidad, es decir que se tenga un mayor grado de personalización a cada problemática que se desee atender con la estrategia de coordinación ECR.

8.6 Limitaciones

Como muchos otros modelos de esta naturaleza, los aquí propuestos intentan abstraer parte de la realidad. El modelado de esa realidad tiene grandes ventajas porque permite, por medio de la experimentación, conocer el comportamiento de los fenómenos. Sin embargo, los modelos no dejan de tener ciertas limitaciones que deben ser consideradas.

Para el caso particular de los modelos aquí propuestos, puede concluirse que por el hecho de considerar sólo el proceso de suministro y el sistema de inventarios, es en sí misma una limitación. Sin embargo, incluir el proceso de producción, los sistemas de comunicaciones, las tecnologías, etc., sería más que imposible cubrir en este tipo de investigación; por tanto, son necesarios ciertos supuestos que podría también considerarse como limitaciones.

En este sentido se encuentra el hecho de que los modelos propuestos en esta tesis no incluyen los costes de inventario del proveedor, debido a que en la estrategia ECR supone que éste conoce plenamente las operaciones de su cliente, y por tanto, reduce al mínimo sus costes de almacenamiento, motivo por el cual los costes son considerados imperceptibles. Tal observación, en cierta forma ya ha sido criticada por Chan y Kingsman (2005).

Lo anterior, lleva a establecer que otra de las limitaciones de la estrategia ECR es que sólo se da si las partes mantienen estrechas relaciones de cooperación y colaboración. Es importante recordar que los modelos requieren de información muy específica y confidencial.

La estrategia ECR también es criticada porque fuerza al cliente a suministrarse sólo en ciertos períodos, convirtiéndose ello en una limitación porque convierte a los esquemas de coordinación un tanto inflexibles.

Otra de las limitaciones, pero relacionadas con el método de generación de soluciones, es el hecho de que el método de los pesos ponderados no produzca la cantidad de soluciones suficientes para visualizar con oportunidad o claridad el rango de preferencias del tomador de decisión. Esto podría llevar a la necesidad de invertir mucho tiempo en la definición de la frontera eficiente.

Finalmente, los modelos propuestos, tienen la limitante de que un mayor número de productos, períodos o un modo de transportes adicional, hacen crecer la complejidad del problema y el procedimiento de solución podría ser computacionalmente inmanejable, principalmente porque los problemas son de programación entera, y porque su nivel de complejidad crece de manera cuadrática (véase sección, 5.5.7; capítulo 5).

8.7 Líneas futuras de investigación

A partir del proceso de investigación y de solución al problema planteado en esta tesis, y teniendo en cuenta las limitaciones antes señaladas, se han reconocido una serie de líneas de futuro de investigación que bien podrían extender los modelos propuestos en esta tesis. Entre los proyectos identificados se encuentran los siguientes:

- a) En esta tesis se han analizado los beneficio logrados a través de la coordinación de los inventarios entre un proveedor que abastece n productos a un cliente desde un punto vista global. En dicho análisis, se reconoció que existen ciertos escenarios donde la coordinación no le favorece al proveedor por los diversos motivos ya expuestos, sin embargo, se prevé que otra razón podría estar detrás de los productos involucrados. Durante el proceso de investigación y análisis se percibió que alguno(s) de los productos estén propiciado dicha situación, ya sea por su precio, los volúmenes de su demanda, el descuento generalizado aplicado a los productos, entre otros aspectos; en tal virtud, la extensión de los modelos propuestos para realizar una exploración en este sentido parece ser propicia.
- b) Para delimitar el ámbito de estudio de la presente tesis, como muchas otras investigaciones, se han adoptado diversos supuestos necesarios para la formulación de los modelos. Uno de los supuestos más fuertes de la estrategia ECR es que los costes del almacenamiento del proveedor son declarados imperceptibles, justificado por las buenas relaciones de la partes involucradas; en tal sentido, la consideración explícita de estos costes podría resultar relevante para extender los modelos para el caso de condiciones no óptimas de comunicación y para vincular la coordinación de los inventarios, no sólo con el sistema de distribución sino también con el sistema de producción.

- c) Para los modelos desarrollados, una extensión propicia será también el de cambiar ciertas condiciones del problema; por ejemplo, contemplar más eslabones en la cadena de suministro, es decir, tener en cuenta fabricantes y distribuidores “*río arriba*” y “*río abajo*” del cliente y del proveedor, ubicados en diferentes sitios; estos también pueden ser del tipo multieslabón (múltiples clientes); modificar los parámetros de coste (por ejemplo, ordenar, almacenar, transporte, etc.); modelar otros esquemas del comercio internacional (*Incoterms*); explicitar los costes de envío (*outbound*) y de recibo (*inbound*), entre otras.
- d) Aunque los modelos de optimización lineal pueden ser resueltos con paquetes computacionales como Cplex, es conveniente desarrollar algún método heurístico para resolverlos, en especial cuando la complejidad de los modelos aumenta debido a las dimensiones del problema.

Referencias

1. (Daganzo, 1996) Daganzo, Carlos F. (1996). “Logistics Systems Analysis”. Springer. 2ª Edition.
2. (Beresford, 1999) Beresford, A.K.C. (1999). “Modelling Freight Transport Costs: a Case Study of the UK-Greece Corridors”. International Journal of Logistics: Research and Applications; vol. 2, num. 3, pp. 229-246.
3. (Chan y Kingsman, 2005) Chan, Chi Kin y Kingsman, Brian G. (2005). “A Co-ordinated Single-Vendor Multi-Buyer Supply Chain Model – Synchronisation of Ordering and Production Cycles”. En “Successful Strategies in Supply Chain Management”, Chapter 1. Eds. Chin-Kin Chan y H.W.J Lee; Idea Group Publishing. 258 pages.

A la fecha, José Elías Jiménez Sánchez es investigador titular del Instituto Mexicano del Transporte por más de 15 años, y tiene a su cargo la línea de investigación “El Transporte en la Cadena de Suministro y su Integración Empresarial”, de la cual ha generado diversas publicaciones técnicas y artículos relacionados. Es catedrático en la Maestría en Ingeniería del Transporte que se imparte en la Universidad Autónoma del Estado de México. Ha desempeñado cargos de Gerente de Logística y Transporte, administrando flotas de transporte y planificando la logística de distribución; ha sido consultor en diversas empresas del sector público y privado. Es Ingeniero en Transporte por la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería y Ciencias Sociales y Administrativas del Instituto Politécnico Nacional de México (UPIICSA- IPN) y tiene una Maestría en Sistemas de Transporte y Distribución de Carga por la Universidad Autónoma de Querétaro, México. Actualmente concluye su Doctorado sobre “Gestión de la Cadena de Suministro e Integración Empresarial” en la Universidad Politécnica de Valencia, España. La peculiaridad de su Doctorado lo especializa en el desarrollo de modelos de empresa en la cadena de suministro y logística integral, con un enfoque en procesos y en la gestión de inventarios entre las áreas de abasto, manufactura y distribución, con la aplicación de técnicas de integración empresarial y de optimización multicriterio para la toma de decisiones.

Noviembre 20, de 2006
(Día de la Revolución Mexicana)
ejimenez@imt.mx
ejimenez11@hotmail.com