

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

Departamento de Organización de Empresas



**UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA**

**Modelos y Algoritmos de Coordinación para la
Planificación de Operaciones basada en el concepto
Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con
alternativas**

TESIS DOCTORAL

PRESENTADA POR:

D. GREGORIO RIUS-SOROLLA

DIRIGIDA POR:

DR. D. JOSE PEDRO GARCÍA-SABATER

DR. D. JULIEN MAHEUT

VALENCIA, Octubre DE 2019

A mi familia Mireya, Roberto, Alex y Rosa

Agradecimientos

Sin el apoyo y la confianza incondicional de las personas que me rodearon durante estos años, hubiera sido imposible este final. Así que para mí es todo un privilegio y un deber dar las gracias a quienes me apoyaron y aguantaron a lo largo de la elaboración de esta tesis.

En primer lugar, quiero agradecer a mi director el Profesor Dr. D. José Pedro García Sabater, la inestimable ayuda y colaboración durante todo el proceso de elaboración de esta tesis doctoral. Su claridad de juicio, su creatividad sin límites, su humanidad y su integridad.

En segundo lugar, quiero agradecer a mi codirector Profesor Dr. D. Julien Maheut, la inestimable ayuda y colaboración durante todo el proceso de elaboración de esta tesis doctoral. Su tesis doctoral me ha servido de inspiración y base para la realización de esta tesis.

Valencia, octubre 2019

Gregorio Rius-Sorolla

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

Título: Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto *Stroke* en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

PRESENTADA POR: D. Gregorio Rius-Sorolla

DIRIGIDA POR: Dr. D. José Pedro García-Sabater y Dr. D. Julien Maheut

Resumen:

Con la globalización de los mercados y el aumento de la competitividad, la coordinación se ha convertido en un punto estratégico en la gestión de la cadena de suministro. De hecho, cada actor de la cadena de suministro ya no debe tomar decisiones sin considerar todos los eslabones, sean proveedores, proveedores de proveedores o clientes y estos internos o externos a la organización. Las cadenas de suministro son cada vez más complejas y distribuidas, compuestas por múltiples organizaciones con diferentes objetivos y políticas. La coordinación se puede lograr utilizando uno de estos dos enfoques para la toma de decisiones coordinadas: centralizada o descentralizada con un mecanismo de coordinación. Pero, las empresas son reacias a compartir información, ya sea por la confidencialidad de los datos o porque los modelos centralizados resultantes son de gran complejidad que dificultan su manejo y actualización. Además, aquellas empresas que buscan tomar decisiones en tiempo real requieren de modelos ligeros y ágiles, que, con toda la información local y coordinada con el resto, permitan tomar decisiones rápidas. Las empresas interesadas en la coordinación descentralizada con un mecanismo de coordinación esperan obtener mejores resultados con respecto a la no coordinación, aunque deberían asumir tener peores resultados que con la coordinación centralizada.

Para ello en esta tesis, se han estudiado los distintos mecanismos de coordinación para la toma de decisiones descentralizada, dentro de un entorno del procedimiento de horizontes rodantes y con herramienta de planificación y programación de las operaciones basada en el concepto de *stroke*, que extiende el concepto de lista de materiales más allá de las estructuras tradicionales. Estos permiten desarrollar la formulación de la programación matemática y los mecanismos de coordinación necesarios para resolver los problemas de planificación de operaciones.

Esta tesis se presenta como una secuencia de capítulos, con el objeto de analizar y presentar la propuesta de mecanismo de coordinación distribuido con unos recursos compartidos. Los distintos capítulos han servido de base para la preparación de artículos científicos. Estos artículos han sido presentados en congresos de la materia y remitidos a revistas científicas.

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

Title: Models and Coordination Algorithms for the Planning of Operations based on the *Stroke* concept in Distributed Supply Networks and with alternatives

PRESENTED BY: D. Gregorio Rius-Sorolla

DIRECTED BY: Dr. D. José Pedro Garcia-Sabater and Dr. D. Julien Maheut

Abstract:

With the globalization of markets and the increase of competitiveness, coordination has become a strategic point in the management of the supply chain. In fact, each actor in the supply chain must no longer make decisions without considering all the links, whether suppliers, sub-suppliers or customers and those internal or external to the organization. Supply chains are increasingly complex and distributed, composed of multiple organizations with different objectives and policies. Coordination can be achieved using one of these two approaches to coordinate decision making: centralized or decentralized with a coordination mechanism. However, companies are reluctant to share information, either because of the confidentiality of the data or because the resulting centralized models are of great complexity that make their management and update them. In addition, those companies that seek to make decisions in real time require lightweight and agile models, which, with all the local information and coordinated with the rest, allow quick decisions. Companies interested in decentralized coordination with a coordination mechanism expect to obtain better results regarding non-coordination although they should assume to have worse results than with centralized coordination.

To this end, in this thesis, the different coordination mechanisms for decentralized decision making have been studied, within an environment of rolling horizons and with tools for planning and scheduling operations based on the concept of *stroke*, which extends the concept of list of materials beyond traditional structures. These allow to develop the formulation of the mathematical programming and the coordination mechanisms necessary to solve the operations planning problems.

This thesis is presented as a sequence of chapters, in order to analyse and present the proposal of distributed coordination mechanism with shared resources. The different chapters have served as the basis for the preparation of scientific articles. These articles have been presented at congresses of the subject and submitted to scientific journals.

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

Títol: Models i Algoritmes de Coordinació per a la Planificació d'Operacions basada en el concepte *Stroke* en Xarxes de Subministrament distribuïdes i amb alternatives

PRESENTADA PER: D. Gregorio Rius-Sorolla

DIRIGIDA PER: Dr. D. José Pedro Garcia-Sabater i Dr. D. Julien Maheut

Resum:

Amb la globalització dels mercats i l'augment de la competitivitat, la coordinació s'ha convertit en un punt estratègic en la gestió de la cadena de subministrament. De fet, cada actor de la cadena de subministrament ja no ha de prendre decisions sense considerar totes les baules, siguin proveïdors, sub-proveïdors o clients i aquests interns o externs a l'organització. Les cadenes de subministrament són cada vegada més complexes i distribuïdes, compostes per múltiples organitzacions amb diferents objectius i polítiques. La coordinació es pot aconseguir utilitzant un d'aquests dos enfocaments per a la presa de decisions coordinades: centralitzat o descentralitzat amb un mecanisme de coordinació. Però, les empreses són poc inclinades a compartir informació, ja siga per la confidencialitat de les dades o perquè els models centralitzats resultants són de gran complexitat que dificulten el seu maneig i actualització. A més, aquelles empresa que busquen prendre decisions en temps real requereixen de models lleugers i àgils, que, amb tota la informació local i coordinada amb la resta, permeten prendre decisions ràpides. Les empreses interessades en la coordinació descentralitzada amb un mecanisme de coordinació esperen obtindre millors resultats respecte de la no coordinació encara que haurien d'assumir tindre pitjors resultats que amb la coordinació centralitzada.

Per a això en aquesta tesi, s'han estudiat els diferents mecanismes de coordinació per a la presa de decisions descentralitzada, dins d'un entorn d'horitzons rodant i amb eines de planificació i programació de les operacions basada en el concepte de *stroke*, que estén el concepte de llista de materials més enllà de les estructures tradicionals. Aquests permeten desenvolupar la formulació de la programació matemàtica i els mecanismes de coordinació necessaris per a resoldre els problemes de planificació d'operacions.

Aquesta tesi es presenta com una seqüència de capítols, a fi d'analitzar i presentar la proposta de mecanisme de coordinació distribuït amb uns recursos compartits. Els diferents capítols han servit de base per a la preparació d'articles científics. Aquests articles han sigut presentats en congressos de la matèria i remesos a revistes científiques.

Contenido

Capítulo 1: Introducción general de la tesis doctoral	27
1.1 Presentación.....	27
1.2 Objetivos y metodología de la investigación	29
1.3 Estructura de la tesis doctoral.....	29
Capítulo 2: Protocolo de revisión sistemática de literatura sobre los mecanismos de coordinación en los modelos de programación matemática para la toma de decisiones descentralizadas y selección de trabajos.....	33
2.1 Introducción	33
2.2 Antecedentes para la revisión sobre mecanismos de coordinación.....	34
2.3 Criterios de inclusión en esta revisión sistemática	38
2.4 Criterios de exclusión en esta revisión sistemática.....	39
2.5 Términos de búsqueda y proceso de búsqueda	40
2.6 Filtrado de artículos	45
2.7 Marco de referencia para la revisión de los trabajos.....	48
2.7.1 Nivel temporal de la decisión coordinada (externo).....	49
2.7.2 Estructura y relación entre los miembros de la CdS (externo)	49
2.7.3 Tipo de relación entre los miembros de la CdS (externo).....	49
2.7.4 Objetivos de la coordinación (externo).....	50
2.7.5 Modelos y pasos en la colaboración (interno)	51
2.7.6 Características de la implantación del mecanismo (internos)	52
2.7.7 Novedades de las soluciones identificadas	53
2.8 Conclusiones.....	53
Capítulo 3: Revisión sistemática de literatura sobre los mecanismos de coordinación en modelos de programación matemática para la toma de decisiones descentralizada.....	55
3.1 Introducción	55
3.2 Proceso de revisión	57
3.3 Mecanismos de coordinación desde el marco de referencia externo	59
3.3.1 Nivel temporal de la toma coordinada de decisiones.....	59
3.3.2 Estructura y relación entre los miembros de la CdS	61
3.3.3 Tipo de relación entre los miembros de la CdS.....	64
3.3.4 Objetivos de la coordinación.....	67
3.4 Mecanismos de coordinación desde el marco de referencia interno.....	69

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

3.4.1	Modelos y pasos en la colaboración	69
3.4.2	Características de la implantación del mecanismo	73
3.4.3	Novedades de las soluciones identificadas	79
3.5	Conclusiones y futuros trabajos	86
Capítulo 4: Relajación Lagrangiana del modelo de Planificación de Operaciones y Materiales Genérico		
89		
4.1	Introducción	89
4.2	Introducción a la formulación GMOP.....	89
4.3	Relajación de Lagrange.....	91
4.4	Aplicación de la relajación Lagrangiana a la formulación GMOP.....	96
4.5	Experimentos numéricos.....	98
4.6	Conclusiones y futuros trabajos	112
Capítulo 5: Banco de instancias para la gestión de la cadena de suministro bajo horizontes rodantes, multiproducto, multinivel, multiproceso para el modelado de la planificación de operaciones capacitadas con strokes.....		
115		
5.1	Introducción	115
5.2	Procedimiento de horizontes rodantes, conceptos básicos y terminología	116
5.3	Propuesta de generación de instancias: elementos comunes.....	120
5.4	Propuesta de generación de instancias: elementos independientes	122
5.4.1	Factor de complejidad del producto por la lista de materiales (BOM) y procesos	122
5.4.2	Factor de saturación de los recursos disponibles	123
5.4.3	Factor del tipo de demanda	123
5.4.4	Factor de distribución irregular de la demanda (Pareto).....	124
5.4.5	Factor de incertidumbre en la demanda (CV).....	125
5.5	Codificación de instancias	126
5.6	Estructura de los ficheros del banco de instancias	126
5.7	Conclusiones y futuros trabajos	128
Capítulo 6: Caracterización del banco de instancias y sus diferentes comportamientos .		
129		
6.1	Introducción	129
6.2	Modelo GMOP con retrasos.....	129
6.3	Propuesta de medibles sobre las propuestas de planificación de operaciones obtenidas a partir del banco de instancias	131

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

6.4	Resolución de las instancias y análisis de normalidad	132
6.5	Análisis del comportamiento de la distribución de los costes totales de las propuestas de planificación obtenidas	137
6.6	Análisis del comportamiento del nerviosismo tipo I de las propuestas de planificación obtenidas.....	146
6.7	Análisis del comportamiento del nerviosismo tipo II de las propuestas de planificación obtenidas.....	152
6.8	Análisis del comportamiento del nivel de servicio de las propuestas de planificación obtenidas.....	161
6.9	Conclusiones y futuros trabajos.....	171
Capítulo 7: Planificación de operaciones distribuidas con un recurso crítico compartido y coordinado con la relajación Lagrangiana con el procedimiento de horizontes rodantes....		175
7.1	Introducción	175
7.2	Breve aproximación a la descomposición de Lagrange	178
7.3	Procedimientos utilizados para el cálculo de la planificación de operaciones con la formulación GMOP.....	180
7.3.1	Planificación de las operaciones descentralizada-descoordinada	180
7.3.2	Planificación de las operaciones con coordinación centralizada	182
7.3.3	Planificación de las operaciones con coordinación distribuida. Descomposición de Lagrange en GMOP.....	182
7.4	Diseño de experimentos, selección de instancias.....	187
7.5	Análisis de los resultados conseguidos de las propuestas de planificación con coordinación centralizada y planificación descentralizada-descoordinada.....	190
7.6	Detalle de la aplicación del procedimiento para el cálculo de las propuestas de planificación con coordinación distribuida	195
7.7	Análisis de los resultados conseguidos de las propuestas de planificación con coordinación distribuida	200
7.8	Análisis de las propuestas de planificación de las entidades STP5R30_4, STP5R30_5 y STP5R30_6 con coordinación distribuida.....	205
7.9	Análisis de las propuestas de planificación de las entidades STP1R30_4, STP1R30_5 y STP1R30_6 con coordinación distribuida.....	211
7.10	Planificación con coordinación distribuida donde una de las entidades tiene un comportamiento oportunista	218
7.11	Conclusiones y futuros trabajos.....	224
Capítulo 8: Conclusiones y líneas futuras		226

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

8.1	Introducción	226
8.2	Resultados y conclusiones.....	226
8.3	Futuras líneas de investigación	227

Bibliografía 229

ANEXOS 245

ANEXO 1:	Instancias utilizadas en el capítulo cuarto	246
ANEXO 2:	Ejemplo de instancia del banco presentado en el capítulo quinto	256
ANEXO 3:	Tablas comparativas de los costes total y los niveles de servicio, en los 52 periodos de análisis, de las distintas propuestas de planificación.....	271
ANEXO 4:	Tablas comparativas del número de periodos en los que se comparte capacidad entre las entidades.....	295
ANEXO 5:	Comparativas entre las propuestas de planificación de las operaciones por los diferentes procedimientos de las instancias STP1R30_1, STP4R30_1 y TTP5R30_1	302
ANEXO 6:	Comparativas de la planificación de operaciones distribuida cuando no se establecen límites a los multiplicadores de Lagrange.....	304
ANEXO 7:	Análisis de las propuestas de planificación con coordinación distribuida de otras entidades.....	310

Índice de Figuras

Figura 2-1: Clúster de palabras clave de autor relacionadas de la selección de referencias.....	44
Figura 2-2: Evolución de las referencias, mediante la forma estandarizada de PRISMA® flow diagram.	47
Figura 4-1: Resultados del Dual y Primal del GMOP con el método del subgradiente recogido por Fisher (2004) de la primera instancia.....	103
Figura 4-2: Resultados del Dual y Primal del GMOP con el método del subgradiente recogido por Fisher (2004) de la octava instancia.	104
Figura 4-3: Evolución de los multiplicadores de Lagrange con el método del subgradiente recogido por Fisher (2004) de la primera instancia en los diez periodos del modelo.	105
Figura 4-4: Evolución de los multiplicadores de Lagrange con el método del subgradiente recogido por Fisher (2004) de la primera instancia en el periodo 9.	105
Figura 4-5: Evolución de los multiplicadores de Lagrange con el método del subgradiente recogido por Fisher (2004) de la primera instancia en el periodo 10.	106
Figura 4-6: Evolución de los multiplicadores de Lagrange con el método del subgradiente recogido por Fisher (2004) de la primera instancia, con más iteraciones.	106
Figura 4-7: Evolución de los multiplicadores de Lagrange con el método del subgradiente recogido por Fisher (2004) de la octava instancia, con más iteraciones.	107
Figura 4-8: Resultados del Dual y Primal del GMOP con el método del subgradiente propuesto por Conejo et al. (2006) de la primera instancia.....	108
Figura 4-9: Detalle de los resultados del Dual y Primal del GMOP con el método del subgradiente propuesto por Conejo et al. (2006) de la primera instancia.	108
Figura 4-10: Resultados del Dual y Primal del GMOP con el método del subgradiente propuesto por Conejo et al. (2006) de la octava instancia.....	109
Figura 4-11: Detalle de los resultados del Dual y Primal del GMOP con el método del subgradiente propuesto por Conejo et al. (2006) de la octava instancia.....	109
Figura 4-12: Evolución de los multiplicadores de Lagrange con el método del subgradiente propuesto por Conejo et al. (2006) de la primera instancia.	110
Figura 4-13: Evolución de los multiplicadores de Lagrange con el método del subgradiente propuesto por Conejo et al. (2006) de la octava instancia.	110
Figura 4-14: Evolución de los multiplicadores de Lagrange con el método del subgradiente propuesto por Conejo et al. (2006) de la octava instancia, con más iteraciones.....	111
Figura 4-15: Detalle de la evolución de los multiplicadores de Lagrange con el método del subgradiente propuesto por Conejo et al. (2006) de la octava instancia, con más iteraciones.....	111

Figura 4-16: Comparación de convergencia entre el método recogido por Fisher (2004) y el método propuesto por Conejo et al. (2006) de la primera instancia	112
Figura 4-17: Comparación de convergencia entre el método recogido por Fisher (2004) y el método propuesto por Conejo et al. (2006) de la octava instancia.	112
Figura 5-1: Elementos del procedimiento de horizontes rodantes.	117
Figura 5-2: Estructuras de los distintos tipos de productos.....	123
Figura 5-3: Representación del reparto de la demanda según la ley Zipf (Newman, 2004).....	125
Figura 6-1: Gráfico de probabilidad normal de los costes totales	134
Figura 6-2: Gráfico de probabilidad normal $\text{Log}_{10}(\text{TCR}_{52})$	135
Figura 6-3: Gráfico de probabilidad normal ISR_1	135
Figura 6-4: Gráfico de probabilidad normal ISR_2	136
Figura 6-5: Gráfico de probabilidad normal NSR	136
Figura 6-6: Interacciones entre tipo de demanda y estructura de producto sobre los costes totales y 95% de Fisher LSD.....	138
Figura 6-7: Interacciones entre tipo de demanda y estructura de producto sobre los costes totales y 95% del Fisher LSD (Coronado-Hernández, 2016).....	139
Figura 6-8: Gráfico de medianas de opciones del factor tipo de producto respecto los costes totales con intervalos del 95% de confianza	140
Figura 6-9: Gráfico de medianas de opciones del factor tipo de demanda respecto los costes totales con intervalos del 95% de confianza.....	140
Figura 6-10: Interacciones entre factor de Pareto y tipo de demanda sobre los costes totales y 95% de Fisher LSD	141
Figura 6-11: Interacciones entre tipo de demanda y factor Pareto sobre los costes totales y 95% del Fisher LSD (Coronado-Hernández, 2016)	141
Figura 6-12: Gráfico de medianas de niveles del factor Pareto respecto los costes totales con intervalos del 95% de confianza.....	142
Figura 6-13: Gráfico de medianas de niveles del factor incertidumbre respecto los costes totales con intervalos del 95% de confianza.....	143
Figura 6-14: Interacciones entre tipo de demanda y la incertidumbre sobre los costes totales y 95% de Fisher LSD.	143
Figura 6-15: Interacciones entre tipo de demanda e incertidumbre sobre los costes totales y 95% del Fisher LSD (Coronado-Hernández, 2016)	144
Figura 6-16: Interacciones entre el factor del tipo de producto y la incertidumbre sobre los costes totales y 95% de Fisher LSD.....	144

Figura 6-17: Interacciones entre incertidumbre y el factor de tipo de producto sobre los costes totales y 95% del Fisher LSD (Coronado-Hernández, 2016)..... 145

Figura 6-18: Gráfico de medianas de niveles del factor saturación respecto los coste totales con intervalos del 95% de confianza..... 146

Figura 6-19: Interacciones entre tipo de demanda y estructura de producto sobre ISR1 y 95% de Fisher LSD. 148

Figura 6-20: Gráfico de medianas de opciones del factor tipo de producto respecto ISR1 con intervalos del 95% de confianza..... 148

Figura 6-21: Interacciones entre factor de Pareto y tipo de demanda sobre ISR1 y 95% de Fisher LSD..... 149

Figura 6-22: Gráfico de medianas de niveles del factor Pareto respecto ISR1 con intervalos del 95% de confianza 149

Figura 6-23: Interacciones entre tipo de demanda y la incertidumbre sobre ISR1 y 95% de Fisher LSD..... 150

Figura 6-24: Gráfico de medianas de niveles del factor incertidumbre respecto ISR1 con intervalos del 95% de confianza..... 150

Figura 6-25: Gráfico de medianas de niveles del factor saturación respecto ISR1 con intervalos del 95% de confianza..... 151

Figura 6-26: Gráfico de medianas de opciones del factor tipo de demanda respecto ISR1 con intervalos del 95% de confianza..... 151

Figura 6-27: Interacciones entre el factor Pareto y la estructura de producto sobre ISR2 y 95% de Fisher LSD. 154

Figura 6-28: Gráfico de medianas de opciones del factor tipo de producto respecto ISR2 con intervalos del 95% de confianza..... 154

Figura 6-29: Interacciones entre el factor Pareto y la estructura de producto sobre ISR* y 95% del Fisher LSD (Coronado-Hernández, 2016) 154

Figura 6-30: Suma de niveles nerviosismo ISR* en diferentes patrones de demanda con respecto a los costes unitarios y los costes de preparación. 155

Figura 6-31: Gráfico de medianas del factor Pareto respecto ISR2 con intervalos del 95% de confianza. 156

Figura 6-32: Gráfico de medianas del factor tipo de demanda respecto ISR2 con intervalos del 95% de confianza. 156

Figura 6-33: Interacciones entre factor de Pareto y tipo de demanda sobre ISR2 y 95% de Fisher LSD..... 157

Figura 6-34: Distribución de valores ISR2 respecto del factor Pareto 157

Figura 6-35: Interacciones entre tipo de demanda y factor de Pareto sobre ISR* y 95% del Fisher LSD (Coronado-Hernández, 2016)..... 158

Figura 6-36: Interacciones entre tipo de demanda y la incertidumbre sobre ISR2 y 95% de Fisher LSD..... 159

Figura 6-37: Gráfico de medianas de niveles del factor incertidumbre respecto ISR2 con intervalos del 95% de confianza..... 159

Figura 6-38: Interacciones entre tipo de demanda y nivel de incertidumbre sobre ISR y 95% del Fisher LSD (Coronado-Hernández, 2016) 159

Figura 6-39: Interacciones entre tipo de demanda y la saturación sobre ISR2 y 95% de Fisher LSD. 160

Figura 6-40: Gráfico de medianas de niveles del factor saturación respecto ISR2 con intervalos del 95% de confianza..... 160

Figura 6-41: Distribución de los valores de NSR..... 163

Figura 6-42: Descomposición de costes y nivel de servicio. 163

Figura 6-43: Interacciones entre tipo de demanda y estructura de producto sobre NSR y 95% de Fisher LSD. 164

Figura 6-44: Gráfico de medianas del factor tipo de producto respecto NSR con intervalos del 95% de confianza. 164

Figura 6-45: Interacciones entre el tipo de producto y tipo de demanda sobre NSR y 95% del Fisher LSD (Coronado-Hernández, 2016) 165

Figura 6-46: Interacciones entre factor de Pareto y tipo de demanda sobre NSR y 95% de Fisher LSD..... 165

Figura 6-47: Gráfico de medianas de niveles del factor Pareto respecto NSR con intervalos del 95% de confianza. 166

Figura 6-48: Interacciones entre tipo de demanda y la incertidumbre sobre NSR y 95% de Fisher LSD..... 166

Figura 6-49: Gráfico de medianas de niveles de incertidumbre respecto NSR con intervalos del 95% de confianza. 167

Figura 6-50: Interacciones entre nivel de incertidumbre y tipo de demanda sobre NSR y 95% del Fisher LSD (Coronado-Hernández, 2016) 167

Figura 6-51: Interacciones entre nivel de incertidumbre y tipo de producto sobre NSR y 95% del Fisher LSD (Coronado-Hernández, 2016) 168

Figura 6-52: Interacciones entre tipo de demanda y la saturación sobre NSR y 95% de Fisher LSD. 168

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

Figura 6-53: Gráfico de medianas de niveles del factor saturación respecto NSR con intervalos del 95% de confianza..... 169

Figura 6-54: Gráfico de medianas de opciones del factor tipo de demanda respecto NSR con intervalos del 95% de confianza..... 170

Figura 7-1: Diagrama de flujo del método de resolución aplicado para cada tramo en el que se planifica 186

Figura 7-2: Estructuras de productos seleccionados. 188

Figura 7-3: Comparativa de costes totales de los 52 periodos de estudio entre descentralizada-descoordinada y coordinación centralizada donde cada tres entidades comparten la capacidad del primer recurso, para tipos de demanda creciente..... 191

Figura 7-4: Comparativa de costes totales de los 52 periodos de estudio entre descentralizada-descoordinada y coordinación centralizada donde cada tres entidades comparten la capacidad del primer recurso, para tipos de demanda estacional creciente. 192

Figura 7-5: Comparativa del nivel de servicio de los 52 periodos de estudio entre descentralizada-descoordinada y coordinación centralizada donde cada tres entidades comparten las capacidades del primer recurso, para tipos de demanda creciente..... 193

Figura 7-6: Comparativa del nivel de servicio de los 52 periodos de estudio entre descentralizada-descoordinada y coordinación centralizada donde cada tres entidades comparten las capacidades del primer recurso, para tipos de demanda estacional creciente. 194

Figura 7-7: Representación de los multiplicadores de Lagrange en las primeras 300 iteraciones, en el tramo en el que se planifica el periodo 49, en la instancia STP1R30_4 que comparte capacidad con STP1R30_5 y STP1R30_6..... 196

Figura 7-8: Representación gráfica comparativa de los costes totales de la coordinación centralizada, descentralizada-descoordinada y la distribuida. 200

Figura 7-9: Representación gráfica comparativa del nivel de servicio respecto de la coordinación centralizada, descentralizada-descoordinada y la distribuida, con demanda creciente. 201

Figura 7-10: Número de periodos ejecutados que se comparte capacidad entre las entidades 202

Figura 7-11: Representación gráfica comparativa de los costes totales de la coordinación centralizada, descentralizada-descoordinada y la distribuida con demanda estacional creciente. 202

Figura 7-12: Representación gráfica comparativa del nivel de servicio respecto de la coordinación centralizada, descentralizada-descoordinada y la distribuida, con demanda estacional creciente. 203

Figura 7-13: Costes medidos totales de las instancias agrupadas en las diferentes planificaciones de operaciones propuestas..... 204

Figura 7-14: Niveles de servicio medios de las instancias agrupadas en las diferentes planificaciones de operaciones propuestas. 204

Figura 7-15: Representación gráfica de la demanda agregada de los productos de las entidades STP5R30_4, 5, 6 y las capacidades compartidas entre entidades. 205

Figura 7-16: Representación gráfica del recurso compartido en el periodo ejecutado y los intercambios de las compensaciones por los recursos compartidos entre las entidades STP5R30_4, 5, 6. 206

Figura 7-17: Periodos con cesión de capacidad en la planificación con coordinación distribuida de la instancia STP530_5 con las instancias STP5R30_4 y STP5R30_6 209

Figura 7-18: Evolución de la demanda de la instancia STP5R30_5 en cada tramo en el que se planifica frente a la demanda del periodo ejecutado 209

Figura 7-19: Evolución de los costes de la función objetivo en cada tramo en el que se planifica de la instancia STP5R30_5..... 210

Figura 7-20: Relación de costes de la función objetivo de la planificación de operaciones de la instancias STP5R30_5 en cada tramo en el que se planifica respecto de la planificación descentralizada-descoordinada, frente a los tramos en los que se planifica con algún periodo en el que se comparta capacidad..... 211

Figura 7-21: Representación gráfica de la demanda agregada de los productos de las entidades STP1R30_4, 5, 6 y las capacidades compartidas entre entidades. 212

Figura 7-22: Representación gráfica del recurso compartido en el periodo ejecutado y los intercambios de las compensaciones por los recursos compartidos entre las entidades STP1R30_4, 5, 6. 212

Figura 7-23: Periodos con cesión de capacidad en la planificación con coordinación distribuida de la instancia STP130_5 con las instancias STP1R30_4 y STP1R30_6 215

Figura 7-24: Evolución de la demanda de la instancia STP1R30_5 en cada tramo en el que se planifica frente a la demanda del periodo ejecutado 216

Figura 7-25: Evolución de los costes de la función objetivo en cada tramo en el que se planifica de la instancia STP1R30_5..... 216

Figura 7-26: Relación de costes de la función objetivo de la planificación de operaciones de la instancias STP1R30_5 en cada tramo en el que se planifica respecto de la planificación descentralizada-descoordinada, frente a los tramos en los que se planifica con algún periodo en el que se comparta capacidad..... 217

Figura 7-27: Representación gráfica comparativa de la distribución de los costes totales de los 52 periodos analizados respecto de las distintas propuesta de planificación. 219

Figura 7-28: Periodos con cesión de capacidad en la planificación con coordinación distribuida con la primera opción analizada de oportunidad de la instancia STP130_5 con las instancias STP1R30_4 y STP1R30_6 220

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

Figura 7-29: Comparativa de costes del periodo ejecutado con la instancia STP1R30_5 222

Figura 7-30: Periodos con cesión de capacidad en la planificación con coordinación distribuida con la segunda opción analizada de oportunidad de la instancia STP130_5 con las instancias STP1R30_4 y STP1R30_6 222

Figura 7-31: Representación gráfica comparativa del nivel de servicio respecto de la coordinación distribuida oportunista de la primera y segunda opción. 223

Figura 0-1: Comparativa de costes entre los distintos procedimientos de planificación de operaciones..... 302

Figura 0-2: Comparativa del nivel de servicio entre los distintos procedimientos de planificación de operaciones..... 303

Figura 0-3: Representación gráfica de la demanda agregada de los productos de las entidades STP1R30_1, STP4R30_1, TTP5R30_1 y las capacidades compartidas entre entidades. 303

Figura 0-4: Representación gráfica del recurso compartido en el periodo ejecutado y los intercambios de las compensaciones por los recursos compartidos entre las entidades STP1R30_1, STP4R30_1, TTP5R30_1..... 303

Figura 0-5: Comparativa de costes totales de los 52 periodos de estudio entre la planificación descentralizada-descoordinada y coordinación centralizada , distribuida y distribuida sin límite a los multiplicadores de Lagrange, donde cada tres entidades comparten la capacidad del primer recurso. 305

Figura 0-6: Comparativa del nivel de servicio de los 52 periodos de estudio entre la planificación descentralizada-descoordinada y coordinación centralizada , distribuida y distribuida sin límite a los multiplicadores de Lagrange, donde cada tres entidades comparten la capacidad del primer recurso. 305

Figura 0-7: Número de periodos ejecutados que se comparte capacidad entre las entidades 306

Figura 0-8: Representación gráfica de la demanda agregada de los productos de las entidades STP1R30_4, 5, 6 y las capacidades compartidas entre entidades, sin limitación en los multiplicadores de Lagrange..... 306

Figura 0-9: Representación gráfica del recurso compartido en el periodo ejecutado y los intercambios de las compensaciones por los recursos compartidos entre las entidades STP5R30_4, 5, 6 , sin limitación en los multiplicadores de Lagrange..... 307

Figura 0-10: Representación gráfica de la demanda agregada de los productos de las entidades STP1R75_4, 5, 6 y las capacidades compartidas entre entidades. 310

Figura 0-11: Representación gráfica del recurso compartido en el periodo ejecutado y los intercambios de las compensaciones por los recursos compartidos entre las entidades STP1R75_4, 5, 6..... 311

Figura 0-12: Periodos con cesión de capacidad en la planificación con coordinación distribuida de la instancia STP175_5 con las instancias STP1R75_4 y STP1R75_6 314

Figura 0-13: Evolución de la demanda de la instancia STP1R75_5 en cada tramo en el que se planifica frente a la demanda del periodo ejecutado 314

Figura 0-14: Evolución de los costes de la función objetivo en cada tramo en el que se planifica de la instancia STP1R75_5..... 315

Figura 0-15: Relación de costes de la función objetivo de la planificación de operaciones de la instancias STP1R75_5 en cada tramo en el que se planifica respecto de la planificación descentralizada-descoordinada, frente a los tramos en los que se planifica con algún periodo en el que se comparte capacidad..... 315

Índice de Tablas

Tabla 2-1: Tabla de elementos de búsqueda y términos afines.	40
Tabla 2-2: Órdenes de las primeras búsquedas utilizadas en cada base de datos.	41
Tabla 2-3: Órdenes utilizadas en la segunda búsqueda en WoS®	42
Tabla 2-4: Resumen de órdenes de búsqueda, trabajos preseleccionados y los duplicados.	43
Tabla 2-5: Revistas de los trabajos a las cuales no se han tenido acceso.	46
Tabla 2-6: Referencias bibliográficas seleccionadas.	46
Tabla 2-7: Referencias seleccionadas.....	48
Tabla 3-1: Mecanismo de coordinación de las referencias seleccionadas.	57
Tabla 3-2: Revista o conferencia de las referencias seleccionadas.....	58
Tabla 3-3: Nivel temporal de la toma coordinada de decisiones en los trabajos seleccionados.	60
Tabla 3-4: Estructura y relación entre los miembros de la CdS en los trabajos seleccionados. .	62
Tabla 3-5: Relaciones entre los miembros de la CdS de los trabajos revisados.....	66
Tabla 3-6: Solución requerida, resultados y sector de los trabajos revisados.....	68
Tabla 3-7: Modelos y pasos en la colaboración de los trabajos revisados.	71
Tabla 3-8: Mecanismo de coordinación de los trabajos revisados.	76
Tabla 3-9: Evaluación de la calidad de la propuesta	80
Tabla 3-10: Aportaciones de los trabajos revisados en programación de la producción.	81
Tabla 3-11: Aportaciones de los trabajos revisados con restricción común.....	82
Tabla 3-12: Aportaciones de los trabajos revisados con limitación de capacidad, multiproducto.	83
Tabla 3-13: Aportaciones de los trabajos revisados donde todos los miembros de la CdS conocen las estructuras de todos los productos.	84
Tabla 4-1: Índices, parámetros y variables utilizados en GMOP.....	90
Tabla 4-2: Rango de valores seleccionados para los parámetros en los ensayos.....	99
Tabla 4-3: Parámetros para los métodos de actualización de los multiplicadores de Lagrange.	100
Tabla 4-4: Rendimientos de los procedimientos aplicados para la relajación de Lagrange.	101
Tabla 4-5: UGAP y LGAP de las instancias con el método del subgradiente.....	102
Tabla 4-6: UGAP y LGAP de las instancias con el método propuesto por Conejo et al. (2006)	102

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

Tabla 5-1: Costes y parámetros comunes en Unidad Monetaria.....	121
Tabla 5-2: Factores multiplicadores de los costes.	121
Tabla 5-3: Parámetros de procesado.	122
Tabla 5-4: Tipos de demandas.	124
Tabla 5-5: Factores de las instancias.....	126
Tabla 6-1: Índices, parámetros y variables usadas in GMOP con retrasos.	130
Tabla 6-2: Resumen estadístico de las mediciones sobre los costes totales	134
Tabla 6-3: Resumen estadístico $\text{Log}_{10}(\text{TCR}_{52})$	134
Tabla 6-4: Resumen estadístico ISR1, ISR2, NSR	135
Tabla 6-5: Análisis de la varianza de los costes totales - Suma de Cuadrados Tipo III.....	137
Tabla 6-6: Análisis de la varianza para ISR1 - Suma de Cuadrados Tipo III	147
Tabla 6-7: Análisis de la varianza para ISR2 - Suma de Cuadrados Tipo III.	153
Tabla 6-8: Análisis de la varianza para NSR - Suma de Cuadrados Tipo III.....	162
Tabla 7-1: Índices, parámetros y variables usadas en GMOP multientidad.	180
Tabla 7-2: Tipos de demanda seleccionados.....	189
Tabla 7-3: Factores seleccionados.	189
Tabla 7-4: Multiplicadores de Lagrange, capacidades y costes en las instancia STP1R30_4, STP1R30_5 y STP1R30_6 en el tramo en el que se planifica el periodo 27 en la planificación con coordinación distribuida	198
Tabla 7-5: Compensaciones unitarias por el derecho de uso de los recursos compartidos de la entidad STP5R30_4	207
Tabla 7-6: Costes totales de los 52 periodos analizados de las instancias STP5R30_4, STP5R30_5, STP5R30_6.....	208
Tabla 7-7: Nivel de servicio de los 52 analizados de las instancias STP5R30_4, STP5R30_5 y STP5R30_6.....	208
Tabla 7-8 : Compensaciones unitarias por el derecho de uso de los recursos compartidos de la entidad STP1R30_4	213
Tabla 7-9: Costes totales de los 52 periodos analizados de las instancias STP1R30_4, STP1R30_5, STP1R30_6.....	214
Tabla 7-10: Nivel de servicio de los 52 analizados de las instancias STP1R30_4, STP1R30_5 y STP1R30_6.....	214
Tabla 7-11: Comparativa costes con oportunos.....	220
Tabla 7-12: Comparativa de niveles de servicio con oportunos.....	220

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

Tabla 7-13: Valores de la función objetivo en los 64 tramos planificados.....	222
Tabla 0-1: Comparativa de los costes totales en los 52 periodos.....	271
Tabla 0-2: Comparativa del nivel de servicio en los 52 periodos.....	283
Tabla 0-3: Número de periodos ejecutados que se comparte capacidad entre las entidades.	295
Tabla 0-4: Costes totales de los 52 periodos analizados de las instancias STP1R30_4, STP1R30_5, STP1R30_6 sin limitación en los multiplicadores de Lagrange.	307
Tabla 0-5: Comparativa de los costes totales de los 52 periodos analizados de las instancias STP1R30_4, STP1R30_5, STP1R30_6 entre la planificación descentralizada-descoordinada y coordinación centralizada , distribuida y distribuida sin límite a los multiplicadores de Lagrange, donde cada tres entidades comparten la capacidad del primer recurso.	308
Tabla 0-6: Comparativa de los niveles de servicio en los 52 periodos analizados de las instancias STP1R30_4, STP1R30_5, STP1R30_6 entre la planificación descentralizada-descoordinada y coordinación centralizada , distribuida y distribuida sin límite a los multiplicadores de Lagrange, donde cada tres entidades comparten la capacidad del primer recurso.	308
Tabla 0-7: Comparativa de los valores de la función objetivo en los 52 tramos planificados de las instancias STP1R30_4, STP1R30_5, STP1R30_6 entre la planificación descentralizada-descoordinada y coordinación centralizada , distribuida y distribuida sin límite a los multiplicadores de Lagrange, donde cada tres entidades comparten la capacidad del primer recurso.	309
Tabla 0-8: Compensaciones unitarias por el derecho de uso de los recursos compartidos de la entidad STP1R75_4	312
Tabla 0-9: Costes totales de los 52 periodos analizados de las instancias STP1R75_4, STP1R75_5, STP1R75_6.....	313
Tabla 0-10: Nivel de servicio de los 52 analizados de las instancias STP1R75_4, STP1R75_5, STP1R75_6.....	313

Capítulo 1: Introducción general de la tesis doctoral

1.1 Presentación

Desde la primera aparición del concepto Cadena de Suministro (CdS) en 1982, según identifican Cooper et al. (1997), se señala que la competencia no es tanto entre las empresas, sino entre las distintas CdS. Por lo tanto, la coordinación dentro del ámbito de la CdS va adquiriendo un papel más relevante. Las mejoras deben coordinarse entre los miembros de la CdS. Los objetivos y las actividades de las organizaciones dentro de la CdS deben vincularse para lograr la optimización global, en lugar de buscar solo la optimización miope de los resultados locales. Por lo que la coordinación de las decisiones en la CdS se ha convertido en un punto estratégico en la dirección de operaciones en las CdS.

Además, con la globalización de los mercados, la liberación de sus barreras, la digitalización, el *e-business*, *e-commerce*, *e-logistics* y *Big Data* es cada vez más necesaria la especialización y la colaboración en la CdS (Kumar et al., 2016). Al mismo tiempo, las organizaciones son más complejas, con más procesos y decisiones que deben ser coordinadas (Tang et al., 2016a), y proveen a mercados exigentes que reclaman a sus productos o servicios mejores calidades, costes y fiabilidad. Por consiguiente, es necesaria una mayor cooperación entre las organizaciones que conforman la CdS (Badole et al., 2012). La CdS debe coordinar sus acciones cuando los usuarios finales no necesitan conocer la ubicación o las características de los recursos requeridos (Attanasio et al., 2006). Estas organizaciones que conforman la CdS pueden pertenecer a una misma organización distribuida (Behnamian, 2014) o a organizaciones diferentes dentro o no de un clúster (Qu et al., 2015) o en varias CdS.

La coordinación se puede lograr utilizando dos enfoques para la toma de decisiones: centralizado o descentralizado con un mecanismo de coordinación (Ogier et al., 2015), dado que sin un mecanismo de coordinación la descentralización se caracteriza por una descoordinación. La coordinación mediante la centralización de la información permite aportar soluciones óptimas al conjunto aunque puedan no ser lo más interesante para cada miembro individual de la CdS (Li et al., 2007). En la coordinación descentralizada, cada miembro individual de la CdS debe velar por tomar las acciones más adecuadas en su ámbito de influencia con la información que tenga disponible. Dado que la información no es siempre compartida en su totalidad entre las distintas organizaciones que conforman la CdS, la situación es identificada como de asimetría en la información. Por lo tanto, estos decisores en la coordinación descentralizada deben colaborar en la toma de decisiones, en situaciones de asimetría en la información, donde ningún decisor dispone de toda la información necesaria (Jeong et al., 2002), al ser miembros de diferentes organizaciones con diferentes objetivos y políticas.

Dentro de las distintas herramientas de gestión de la dirección de operaciones, se selecciona en esta tesis la programación matemática por sus cualidades para resolver problemas reales de planificación de producción (Pochet et al., 2006; Tolio et al., 2011). Por otro lado, es necesario elaborar mecanismos para que los modelos de programación matemática, de cada decisor, se

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

alineen en las actividades necesarias para la creación de valor en el producto o servicio ofrecido a los clientes de la CdS (Stadtler, 2007).

La coordinación se puede realizar en un único momento o en una serie de instantes sucesivos y los parámetros de cada uno de los miembros coordinados pueden variar entre los distintos instantes. Al ampliar los periodos de análisis, pueden aparecer incertidumbres sobre la información futura y una mayor complejidad a la hora de identificar las sucesivas acciones más adecuadas para una coordinación de la CdS en cada periodo. El procedimiento de horizontes rodantes facilita solucionar esta planificación de operaciones en los modelos multiperiodo. El procedimiento de horizontes rodantes es una herramienta habitualmente utilizada en la industria (Stadtler, 2000) y es usada en esta tesis.

En esta tesis doctoral, mediante la aplicación de un protocolo sistemático de revisión de la literatura, se ha podido identificar algunos de los mecanismos de coordinación existentes en modelos de programación matemática para la toma de decisiones descentralizadas. Se ha propuesto y se ha aplicado un marco de referencia para el análisis de los mecanismos de coordinación identificados. De dicho análisis se han podido resaltar diferentes oportunidades en los trabajos sobre mecanismos de coordinación de la CdS. Se destaca la falta de trabajos que utilicen una representación de las estructuras de producto diferente a la de Gozinto y la necesidad de analizar la descomposición de Lagrange en el modelado *Generic Materials and Operations Planning* (GMOP) (García-Sabater et al., 2013). Por dicho motivo, la tesis presenta un análisis de la aplicación de la relajación Lagrangiana en la formulación GMOP. Y, por último, expone y analiza una propuesta de un mecanismo de coordinación de operaciones distribuidas con un recurso compartido con el concepto *strokes* en un entorno de horizontes rodantes en redes de suministro distribuidas incluyendo estructuras de producto con alternativas.

Para validar la propuesta, la tesis presenta un banco de instancias para la gestión de la cadena de suministro bajo el procedimiento de horizontes rodantes, multiproducto, multinivel, multiproceso para el modelado de la planificación de operaciones capacitadas con *strokes*. Dicho banco de instancias amplía la propuesta realizada por Coronado-Hernández (2016) al incluir la modelización de procesos alternativos, elemento diferencial de la modelización con *strokes*, la modelización de una demanda estacional decreciente y la inclusión de un factor de la capacidad de recursos disponible. Además, el banco de instancias utiliza una estructura de ponderación de los costes con tal de evitar las simetrías que presentaba su estructura de costes. Sus diferentes comportamientos y caracterización del banco de instancias se presentan. Una serie de instancias de este banco permite validar la propuesta del mecanismo de coordinación distribuido expuesta en la tesis.

El resto del capítulo está estructurado de la siguiente manera: en primer lugar, se presenta el objetivo y metodología de la investigación de la tesis; en segundo lugar, se presenta la estructura de la tesis doctoral.

1.2 Objetivos y metodología de la investigación

Esta tesis doctoral aborda el problema de la planificación de las operaciones en entorno multiempresa proponiendo una metodología de mecanismo de coordinación bajo el modelo *strokes* que permite el uso compartido de un conjunto de recursos bajo decisores independientes, distribuidos, cada uno con su propio objetivo y modelo propio de negocio, sin ninguna prevalencia de poder entre las entidades. Este proyecto de tesis doctoral y las publicaciones científicas desarrolladas a partir de este documento, surgen de la carrera profesional del autor de esta tesis, D. Gregorio Rius-Sorolla, con distintos puestos de responsabilidad en la industria de automóvil y en el sector logístico, como gerente de un 3PL y un *Tier 0.5* en el sector de automoción. Igualmente, el continuo contacto del director de la tesis, Prof. Dr. D. José Pedro García-Sabater y del co-director Dr. D. Julien Maheut con empresas del sector del automóvil y empresas del sector de bienes de consumo ha permitido el desarrollo de este trabajo.

Durante los años de trabajo en las empresas y a partir de la revisión del estado del arte realizado sobre las publicaciones científicas de estas herramientas, se han detectado varias oportunidades de líneas de investigación. De ellas, esta tesis se ha centrado en entender los mecanismos de coordinación distribuidos en entornos industriales bajo el procedimiento de horizontes rodantes para que el método presentado de coordinación de la planificación y programación de las operaciones pudieran ser adaptado a cualquier sector industrial en entornos globalizados.

En esta tesis se van a estudiar las distintas herramientas de coordinación distribuida identificadas y proponer la aplicación sobre una estructura de datos genérica, basada en el concepto de *stroke* que extiende el concepto de lista de materiales más allá de las estructuras tradicionales presentes en las herramientas comerciales existentes. Esto permite dar soporte a la planificación y programación de manera más generalizada, multiempresa, con decisores distribuidos, pudiendo abarcar cualquier operación. Por último, se presentan los resultados de la simulación de tres entidades que comparten la capacidad de sus recursos, sin ninguna prevalencia de poder, al aplicar la planificación de sus operaciones con una coordinación distribuida.

1.3 Estructura de la tesis doctoral

La tesis está estructurada en ocho capítulos. Seguidamente se presenta un breve resumen de los capítulos que siguen a esta introducción.

- **Capítulo 2. Protocolo de revisión sistemática de literatura sobre los mecanismos de coordinación en los modelos de programación matemática para la toma de decisiones descentralizadas y selección de trabajos.** En el mismo se presenta el protocolo de investigación utilizado para la realización de la revisión sistemática de literatura sobre los mecanismos de coordinación en los modelos de programación matemática, para la toma de decisiones descentralizadas sobre la planificación y programación de las

operaciones, entre plantas de la misma empresa o entre plantas de diferentes empresas.

- **Capítulo 3. Revisión sistemática de literatura sobre los mecanismos de coordinación en modelos de programación matemática para la toma de decisiones descentralizada.** El aumento en la complejidad de las cadenas de suministro requiere mayor esfuerzo para alinear las actividades de todos sus miembros a fin de mejorar la creación de valor de sus productos o servicios ofrecidos a los clientes. En general, la información es asimétrica, cada miembro tiene su propio objetivo y limitaciones que pueden estar en conflicto con los de otros miembros. Las gerencias de operaciones enfrentan al desafío de coordinar las actividades de tal manera que la cadena de suministro en su conjunto se mantenga competitiva, mientras que cada miembro mejore al cooperar. Este capítulo tiene como objetivo ofrecer una revisión sistemática de la planificación colaborativa en la última década sobre los mecanismos de coordinación en los modelos de programación matemática que permitan posicionar los conceptos existentes e identificar las áreas donde se necesita más investigación.
- **Capítulo 4. Relajación Lagrangiana del modelo de Planificación de Operaciones y Materiales Genéricos.** La gestión de la cadena de suministro requiere cada vez de más propuestas para la planificación de operaciones que reúnan sus singularidades especiales. Los modelos de programación matemática deben permitir resolver productos coexistentes y procesos alternativos o subproductos. La formulación de *Planificación de Operaciones y Materiales Genéricos* (GMOP) permite operar con diferentes materiales y listas de procesos. El capítulo presenta un procedimiento para resolver el versátil modelo GMOP mediante la relajación de Lagrange. El método de actualización del subgradiente del multiplicador de Lagrange se compara con otro método de actualización lineal. El método de subgradiente permite obtener un límite inferior más rápido en comparación a un método lineal, pero este otro método proporciona mejores soluciones después de ciertas iteraciones.
- **Capítulo 5. Banco de instancias para la gestión de la cadena de suministro bajo horizontes rodantes, multiproducto, multinivel, multiproceso para el modelado de la planificación de operaciones capacitada con *strokes*.** En este capítulo, se presenta un método generador de banco de instancias y una base de datos de instancias para el análisis con el procedimiento de horizontes rodantes de productos con varias estructuras de producto, multiproducto, multistroke, capacidad múltiple con diferentes patrones de demanda estocástica para el modelado de programación matemática con costes de las operaciones, preparación de pedido, almacenamiento y retrasos para la gestión de las operaciones con *strokes*.
- **Capítulo 6. Caracterización del banco de instancias y sus diferentes comportamientos.** Las instancias generadas en el capítulo anterior son usadas bajo la formulación GMOP para caracterizar y analizar su comportamiento bajo los medibles y parámetros

seleccionados. Este análisis es realizado mediante la comparación con las aportaciones realizadas por Omar & Bennell (2009) y por Coronado-Hernández (2016) en sus diferentes bancos de instancias.

- **Capítulo 7. Planificación de las operaciones distribuidas con un recurso crítico compartido y coordinado con la relajación Lagrangiana con el procedimiento de horizontes rodantes.** Un desafío de la gestión de las operaciones es alinear las actividades dentro de su cadena de valor, ya sea de producto o de servicio. Tal cadena de suministro puede incluir miembros tanto inter organizacionales como intra organizacionales y cada miembro generalmente tiene sus propios objetivos y limitaciones. La gerencia debe establecer mecanismos de coordinación adecuados, a pesar de la asimetría de la información, para que la cadena en su conjunto pueda ser competitiva ante las posibles situaciones del mercado. Además, los mecanismos de coordinación deben establecerse en situaciones en las que sus miembros compitan en diferentes cadenas de suministro y tengan capacidad disponible. Este capítulo analiza la propuesta de unos recursos críticos compartidos entre diferentes organizaciones en su comportamiento en ciertas situaciones de demanda, incertidumbre, producto y complejidad. El capítulo presenta una mejora competitiva para todos los miembros, tanto en el uso del exceso de capacidad como en la planificación de sus operaciones. Para esto, se ha aplicado un mecanismo de coordinación distribuida en modelos de programación matemática con objetivos independientes. El mecanismo está basado en la relajación Lagrangiana de la formulación GMOP, con el procedimiento de horizontes rodantes, que comparten solo su capacidad disponible.
- **Capítulo 8. Conclusiones.** Este último capítulo de la tesis recoge las conclusiones alcanzadas tras la realización del trabajo. A lo largo de la tesis se han tenido que ir tomando decisiones, dejando líneas de investigación para futuros trabajos. Así, se pretende finalizar esta tesis doctoral presentando las más interesantes.

Esta tesis se plantea como una colección de capítulos que amplían y completan los artículos científicos presentados en diferentes congresos y revistas sobre la materia donde las limitaciones de espacio impedían desarrollar. El capítulo segundo ha servido para la realización y publicación del artículo científico *“Protocol: Systematic Literature Review on coordination mechanisms for the mathematical programming models in production planning with decentralized decision making”* en la revista *“WPOM-Working Papers on Operations Management”* (Rius-Sorolla et al., 2017). El tercer capítulo fue presentado en el *11th International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management* celebrado en Valencia en 2017 recibiendo el reconocimiento como *Best Paper Award* en el área de *Operation Research, Modelling and Simulation* y ha servido para la realización de un artículo científico *“Coordination mechanisms with mathematical programming models for decentralized decision-making, a literature review”*, publicado en la revista *“Central European Journal of Operations Research (CEJOR)”* (Rius-Sorolla et al., 2018b). El cuarto capítulo fue presentado también en el *11th International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management* celebrado en Valencia en 2017 y ha servido para la realización de un artículo científico, publicado en la

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

revista "*Central European Journal of Operations Research (CEJOR)*" (Rius-Sorolla et al., 2018a). El quinto capítulo fue presentado en el *12th International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management* celebrado en Girona en 2018, recibiendo el reconocimiento como *Best Paper Award* en el área de Supply Chain Management and Logistics y ha servido para la realización del artículo científico "*Supply Chain Management test bed under rolling horizons, multiproduct, multiechelon, multiprocess for capacitated production planning modelling with strokes*", remitido a la revista "*Central European Journal of Operations Research (CEJOR)*". El sexto capítulo fue presentado en el *29th European Conference on Operational Research (EURO 2018)* celebrada en Valencia, España, Julio 8-11, 2018 (Rius-Sorolla et al., 2018c).

Capítulo 2: Protocolo de revisión sistemática de literatura sobre los mecanismos de coordinación en los modelos de programación matemática para la toma de decisiones descentralizadas y selección de trabajos¹

2.1 Introducción

Con la globalización de los mercados, la liberación de sus barreras, la digitalización, el *e-business*, *e-commerce*, *e-logistics* y *Big Data* es cada vez más necesaria la especialización y la colaboración en la Cadena de Suministro (CdS) (Kumar et al., 2016). Al mismo tiempo, las organizaciones son más complejas, con más procesos y decisiones que deben ser coordinadas (Tang et al., 2016a). Y proveen a mercados exigentes que reclaman a sus productos o servicios mejores calidades, menores costes y mayor fiabilidad, necesitando por lo tanto, una mayor cooperación entre las organizaciones que conforman la CdS (Badole et al., 2012). Pero la decisión que sugiere la coordinación mediante la centralización de la información, aún permitiendo encontrar una solución óptima, no es siempre la de mayor interés para cada miembro individual de la CdS (Li et al., 2007). Esto se debe a que cada miembro de la cadena de suministro dispone de su propia información, con diferentes objetivos y limitaciones, que tal vez no desee compartir en su totalidad. Esta descentralización de la información implica que la toma de decisiones debe descentralizarse a lo largo de la cadena de suministro, coordinada a través de algún protocolo de negociación (Walsh, 2001). Estos decisores descentralizados deben colaborar en la toma de decisiones, en situaciones de asimetría en la información, donde ningún decisor dispone de toda la información necesaria (Jeong et al., 2002). Estos decisores pueden pertenecer a una misma organización distribuida (Behnamian, 2014) o a organizaciones diferentes dentro o no de un clúster (Qu et al., 2015) o en varias CdS. Por lo tanto, es necesario elaborar mecanismos para que los modelos de programación matemática, de cada decisor, se alineen en las actividades necesarias para la creación de valor en el producto o servicio ofrecido a los clientes (Stadtler, 2007). Este trabajo se centra en los mecanismos de coordinación para la toma de decisiones sobre la planificación de las operaciones, donde las decisiones son tomadas a través de modelos de programación matemática.

El capítulo plasma el protocolo utilizado para la realización de una revisión sistemática de literatura que trate de identificar los mecanismos de coordinación para la asignación de recursos

¹ Una versión previa de este capítulo ha servido para la realización y publicación del trabajo "*Protocol: Systematic Literature Review on coordination mechanisms for the mathematical programming models in production planning with decentralized decision making*" en la revista "*WPOM-Working Papers on Operations Management*" (Rius-Sorolla et al., 2017)

en la planificación de las operaciones entre unidades descentralizadas de la CdS dentro de la programación matemática. Al utilizar el procedimiento de revisión sistemática de literatura se permite responder a la necesidad de disponer de un protocolo que permita realizar una revisión de la literatura replicable, transparente y sistemática. El periodo que abarca la revisión es desde el año 2006 hasta el 2016, dado que se va a considerar como punto de inicio la revisión de los mecanismos de coordinación presentada por Stadtler (2007).

Para la realización de este protocolo se ha seguido la propuesta de procedimiento de revisión sistemática de literatura (SLR), presentada y utilizada por Marín et al. (2015) y Medina-López et al. (2010). Este procedimiento recomienda los siguientes pasos: establecer un objetivo, seleccionar el tipo de referencias y la base de datos donde buscar, identificar los filtros de búsqueda y selección, administrar las referencias, extraer la información de las referencias seleccionadas y finalmente escribir el informe.

Este protocolo de revisión sistemática sobre los mecanismos de coordinación e incentivos para la planificación colaborativa de las operaciones entre unidades descentralizadas y autónomas dentro de la programación matemática se centra en los trabajos con demandas determinadas exógenamente, independiente de los costes. Estas limitaciones dejan entre otras la posibilidad para futuras líneas de investigación los casos donde la demanda podrían ser dependiente de los precios, donde el objetivo sería maximizar las ventas asumiendo que los costes de las operaciones e inventario son independientes de los precios (Li et al., 2007), pero serían mecanismos de coordinación en las áreas de marketing que se aleja del objetivo de esta tesis.

Además, se excluyen también los mecanismos de coordinación referidos a las áreas de economía, la teoría de juegos, modelados del vendedor de periódicos, protocolos de contratos y los trabajos de líneas de investigación centradas en la programación en base a agentes por entenderse ajenos a esta tesis.

El resto del capítulo está estructurado de la siguiente manera: primero se presentan los antecedentes, en segundo lugar, aparecen los criterios de inclusión, en tercer lugar, se exponen los criterios de exclusión, en cuarto lugar, se plantean los términos de búsqueda, en quinto lugar, se expone el filtrado de artículos, en sexto lugar se presenta el marco de referencia para la revisión de los trabajos y finalmente se exponen las conclusiones.

2.2 Antecedentes para la revisión sobre mecanismos de coordinación

Se pueden encontrar diferentes revisiones de literatura sobre la coordinación en la Cadena de Suministro. Jeong & Leon (2002) presentan el protocolo llamado *Cooperative Interaction via Coupling Agents* (CICA) y una revisión de la literatura inicial. En esa revisión, los autores analizan los métodos de coordinación, clasificándolos en: primero descomposición matemática (Dantzig-Wolfe, Benders y Lagrangian Relaxation) donde asimilaban que todos ellos necesitan de un coordinador centralizado; segundo las subastas como herramientas de coordinación y tercero los trabajos con multiagentes denominados como "Constraint-directed Heuristic Search". Li et al. (2007) realizan una revisión de los mecanismos de coordinación en el área de los contratos

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

que gestionan estas relaciones en función de la estructura de la decisión y la naturaleza de la demanda. Arshinder et al. (2008, 2011) ofrecen una clasificación general de la coordinación de la cadena de suministro y hacen referencia a los mecanismos de coordinación, con una visión global, sin entrar en detalles de las distintas opciones para la programación matemática.

Frayret & Member (2009) realizan una revisión sobre la coordinación de la cadena de suministro distribuida, agrupándola en tres enfoques. Un enfoque basado en la coordinación heurística donde se realiza una coordinación parcial al compartir cierta información, como en la coordinación aguas arriba. Un enfoque centrado en la coordinación basado en agentes donde los clasifican según sea por compartir información o por el resultado de una subasta. Y, por último, el enfoque de las coordinaciones basadas en las descomposiciones matemáticas donde listan trabajos basados en la descomposición de Lagrange y en la descomposición de Benders. Badole et al. (2012) realizan una revisión de los distintos tipos de modelado de la cadena de suministro, pero no entran en el detalle de los mecanismos de coordinación en los modelos distribuidos. Kumar et al. (2016) realizan una revisión de la literatura sobre los modelos de coordinación de la cadena de suministro respecto de los mecanismos utilizados en las relaciones contractuales en las cadenas de suministro de dos o tres niveles, como los descuentos por cantidad, el crédito comercial, los descuentos en el precio, los descuentos en volúmenes y los periodos de reposición. Tang et al. (2016) realizan una revisión de los trabajos que integran diferentes áreas de la cadena de suministro. La revisión agrupa los trabajos según el número de productos, los tipos de objetivos (coste, beneficio o mixto), los tipos de demanda y enfoques de resolución empleado, pero sin analizar en detalle los mecanismos de coordinación utilizados.

Estas revisiones de literatura (Arshinder et al., 2008, 2011; Badole et al., 2012; Frayret et al., 2009; Jeong et al., 2002; Kumar et al., 2016; Li et al., 2007; Tang et al., 2016a) no se las puede identificar como SLR. Además, de acuerdo al mejor de mi conocimiento, se debe identificar como la más reciente revisión de la literatura que específicamente profundiza en los mecanismos de coordinación en modelos de programación matemática y en cadenas de suministro descentralizada el trabajo de Stadtler (2007). Por todo lo anterior, se plantea la necesidad de realizar una revisión sistemática de literatura desde 2006 sobre los mecanismos de coordinación determinista descentralizada.

Jeong & Leon (2002) establecen como organizaciones que se coordinan, aquellas organizaciones autónomas que pueden ser lógicas o físicamente diferentes entre sí, pero que cooperan entre sí para lograr un objetivo global y con la necesidad de compartir información, aún siendo limitada debido a la privacidad de los agentes. Por otro lado, Arshinder et al. (2008) resaltan en su revisión de la literatura que la definición de coordinación más comúnmente aceptada en la literatura es el acto de gestionar las dependencias entre entidades y el esfuerzo conjunto de entidades que trabajan juntas para lograr objetivos mutuamente definidos de Crowston et al. (1994). Sahin & Robinson (2002) identificaron que una cadena de suministro está totalmente coordinada cuando todas las decisiones se alinean para lograr los objetivos globales del sistema y que existe una falta de coordinación cuando los responsables de la toma de decisiones

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

disponen de una información incompleta o persiguen incentivos que no son compatibles con los objetivos de todo el sistema.

Por otro lado, en el ámbito profesional, destaca el Council of Supply Chain Management Professional (CSCMP) la necesidad de la coordinación y colaboración en su definición de la dirección de la cadena de suministro. *“La gestión de la cadena de suministro abarca la planificación y la gestión de todas las actividades relacionadas con el aprovisionamiento y la adquisición, la conversión y todas las actividades de gestión logística. Es importante destacar que también incluye la coordinación y colaboración con los socios de canal, que pueden ser proveedores, intermediarios, proveedores de servicios a terceros y clientes. En esencia, la gestión de la cadena de suministro integra la gestión de la oferta y la demanda dentro y entre las empresas”* (CSCMP, 2017).

Stadtler (2007) menciona la alineación de las actividades futuras de los miembros como forma de lograr la coordinación. Por lo tanto, hacen falta mecanismos de coordinación e incentivos para alinear los planes de acción y favorecer que se comparta la información necesaria para que los responsables de la toma de decisiones descentralizadas puedan actuar en el mejor interés de su unidad y del sistema (Li et al., 2007). Para la coordinación se entiende, que se está asumiendo la existencia de una voluntad de cooperar y de contribuir a la generación de un plan aceptable por los miembros de la CdS (Stadtler, 2007). Dichos mecanismos de coordinación pueden reasignar los beneficios de la coordinación, a fin de facilitar la cooperación y solucionar posibles conflictos entre los objetivos y las restricciones de cada unidad (Jung et al., 2008).

En el intento por llegar a un acuerdo de plan conjunto, se encuentran las subastas como mecanismo de coordinación. Las subastas pueden ser de un solo producto o servicio o la combinación de varios servicios o productos, subastas combinatorias. Uno de los inconvenientes de las subastas combinatorias es su elevado número de combinaciones posibles, para n productos, hay 2^n combinaciones de productos que pueden pujarse (Wellman et al., 2001), incrementando las necesidades computacionales. En las subastas, puede pujar solo una entidad o varias entidades a la vez. En las subastas donde solo puja una de las entidades, la entidad en silencio tiende a obtener mejores condiciones que la entidad que puja (Attanasio et al., 2006). En una situación equivalente se encuentran los mecanismos de coordinación jerárquicos, donde una de las partes informa de sus necesidades y es la otra parte quien puede ofrecer alternativas o pujas. Uno de los principales desafíos en la eficiencia computacional del mecanismo de las subastas es su baja velocidad de convergencia (Lau et al., 2011). Una posible solución al desafío es utilizar los métodos de actualización de los multiplicadores de Lagrange de las descomposiciones matemáticas. Este proceso acelera la convergencia y sirve de mecanismo de coordinación (Ertogral et al., 2000; Kutanoğlu et al., 1999) al aprovechar la descomposición matemática como mecanismo de coordinación. Otra alternativa para acelerar la búsqueda entre las alternativas de un plan conjunto es utilizar herramientas metaheurísticas como mecanismo de coordinación (Frayret et al., 2009). El recocido simulado (Buer et al., 2015; Dudek et al., 2007; Eslíkizi et al., 2015; Ziebuhr et al., 2013, 2015) o el símil de las feromonas de las hormigas (Silva

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

et al., 2009) son herramientas metaheurísticas utilizadas que permiten agilizar la identificación de una propuesta para la coordinación.

Estos mecanismos de coordinación deben influir en las decisiones de los agentes independientes para evitar comportamientos oportunistas o aportes de información falsos que no permitan el correcto reparto de los beneficios generados por la colaboración (Lehoux et al., 2014). Los mecanismos deben desarrollar la confianza para construir la colaboración y así las mejoras locales en costes o en beneficios repercutirán en una mejora global de la cadena de suministro. Dado que minimizar los costes locales de cada agente y minimizar los costes globales de la cadena de suministro generalmente son objetivos contradictorios (Ziebuhr et al., 2015), los mecanismos de coordinación deben intentar que los objetivos locales tiendan igualmente a una mejora de la cadena de suministro en su conjunto.

Albrecht (2010) define los mecanismos de coordinación como aquellos mecanismos con los cuales las entidades descentralizadas e interesadas puede lograr la implementación de estrategias óptimas para un resultado coordinado y no contradice la racionalidad individual de las partes participantes ni el balance presupuestario del sistema. Y llama planificación colaborativa a la negociación entre los agentes que permite desarrollar los mecanismos de coordinación.

Stadtler (2007) define la planificación colaborativa como un proceso conjunto de toma de decisiones para alinear los planes de los miembros individuales de la cadena de suministro con el objetivo de lograr la coordinación a la luz de la asimetría de la información. Mejias-Sacaluga et al. (2003) proponen 4 niveles en la evolución de esta negociación: negociaciones amistosas, cooperación, coordinación y colaboración. Bajo esa perspectiva la coordinación es un paso previo de la colaboración.

Kelly & Zyngier (2008) aportan en la evolución de la relación entre cooperadores, que a medida que cada cooperador encuentra una solución a su propio problema de toma de decisión, se esfuerza por llegar a un consenso con los cooperadores adyacentes en función de su solución local. El razonamiento colaborativo alcanza, en el mejor de los casos, la conformidad miope entre los cooperadores conectados. Esta coordinación permitiría mejorar respecto de un estado previo sin coordinación, definida como coordinación débil (Kovács et al., 2013). Por otro lado, Kovács et al. (2013) definen como coordinación fuerte cuando los óptimos locales conducen a un rendimiento óptimo en todo el sistema, o que el conjunto de óptimos de la cadena de suministro está en un equilibrio de Nash. El equilibrio de Nash es cuando ninguna empresa tiene una desviación unilateral rentable del conjunto de acciones óptimas de la cadena de suministro (Cachon, 2003).

Respecto de las prácticas comerciales de las empresas y los mecanismos de coordinación, VICS (2004) recoge las directrices CPFR (Collaborative Planning, Forecasting and Replenishment) diseñadas para conducir la negociación y mejorar el flujo de mercancías desde los proveedores de materias primas, pasando por los fabricantes, hasta los estantes de los minoristas. De acuerdo con la literatura sobre las cadenas de suministro colaborativas, CPFR cuenta con tres

niveles según la información compartida: básico, en desarrollo y nivel avanzado. El CPFR avanzado es cuando la información es compartida de forma transparente (Ramanathan et al., 2014). Pero el modelo CPFR no está totalmente automatizado (Jia et al., 2016) ni tampoco desarrollan los mecanismos de coordinación o incentivos de una planificación colaborativa.

Respecto a la implantación de los mecanismos de coordinación, Barratt (2004) menciona la necesidad de establecer una cultura de colaboración basada en 4 elementos principales: confianza, beneficios mutuos, intercambio de información y comunicación. Y para la generación de esta cultura colaborativa, Vitasek et al. (2013) proponen cinco reglas básicas: Centrarse en los resultados a largo plazo y no en las transacciones, focalizarse en el “qué” y no en el “cómo”, consensuar y establecer un acuerdo claro de los medibles que valorarán el resultado, modelo de precios basados en incentivos y estructura de gobierno que aporte conocimiento y no solo control o supervisión. Ramanathan & Gunasekaran (2014) resaltan 7 dimensiones para la colaboración, siendo estas el intercambio de información, congruencia de objetivos, sincronización de decisiones, alineación de incentivos, uso compartido de recursos, comunicación y creación conjunta de conocimiento. Estos elementos deberán acompañar a los mecanismos de coordinación si se desea establecer una planificación colaborativa.

Estos antecedentes de coordinación, mecanismos, descentralizados, deterministas y tipos de relaciones permiten determinar los criterios de inclusión y los de exclusión que se van a utilizar en esta revisión sistemática de literatura.

2.3 Criterios de inclusión en esta revisión sistemática

Los criterios de inclusión deben ser lo suficientemente amplios para asegurar que no se excluye ninguna referencia, pese a que esta decisión pueda generar numerosos falsos positivos, para ello:

- Los trabajos deberán cumplir el objetivo de la revisión sistemática, de presentar y/o utilizar mecanismos de coordinación, aplicados o propuestos para situaciones asimétricas de información, descentralizados, en el área de operaciones y con demandas determinadas exógenamente.
- La búsqueda será en la bases de datos Scopus®, Web Of Science® de acceso para la comunidad científica desde el portal del Ministerio de Economía y Competitividad (<https://www.recursoscientificos.fecyt.es/>) y se seleccionarán aquellos trabajos a los que se tiene acceso desde la Universitat Politècnica de València, por ser desde donde se realizará la revisión sistemática.
- Las fechas de publicación de los trabajos seleccionados serán entre el 2006 al 2016, dado que se parte del trabajo previo, como punto de inicio, la revisión de los mecanismos de coordinación presentada por Stadtler (2007).
- Los trabajos incluidos serán aquellos escritos en inglés, castellano o francés, al ser idiomas que son comprendidos por el equipo de la revisión sistemática.

2.4 Criterios de exclusión en esta revisión sistemática

A los artículos encontrados se les va a aplicar los siguientes criterios de exclusión, afines al objetivo y refinados después de un primer muestreo:

- Se excluirán las reflexiones sobre los beneficios de la coordinación que no introduzcan mecanismos de coordinación.
- Las revisiones literarias no serán incluidas, pero sí identificadas dado que permiten identificar posibles fallos en la revisión sistemática.
- Respecto de las áreas de aplicación, se van a excluir la generación de energía, la cartografía o la comunicación entre sensores donde no haya una negociación asimétrica de la información, sino una búsqueda de economizar la comunicación entre agentes y no aporten un mecanismo de coordinación distribuido de información asimétrica.
- También se van a descartar los trabajos que se basan en la búsqueda de coeficientes, valores o funciones de equilibrio basados en la teoría de juegos o en la teoría de contratos. Estos trabajos están realizados con una perspectiva teórica diferente al objetivo de la investigación.
- Los trabajos con demandas desconocidas o no discretas, aquellos que estudian sus consecuencias sobre los puntos de equilibrio y no presentan mecanismos de coordinación para llegar a dichos puntos no serán incluidos. Ello es debido a que el objetivo es identificar mecanismo de coordinación más que identificar los puntos de equilibrio.
- Los trabajos que solo aborden el problema con una coordinación centralizada sin comparar con otros enfoques son descartados.
- Los trabajos que proponen soluciones algebraicas como “Joint Economic Lot Size Models” (JELS) serán excluidos. En dichos trabajos, se trabajan las formulaciones para lograr lotes económicos conjuntos, pero no en la búsqueda de mecanismos de coordinación distribuido, objetivo de la investigación.
- Aquellos trabajos en programación dinámica que no profundicen en los mecanismos de coordinación para la toma de decisiones en situaciones asimétricas de información, descentralizados y en las áreas de operaciones o programación de las operaciones con demandas determinadas exógenamente serán excluidos.
- Finalmente, los estudios de propuestas CPFR, sin mecanismos de coordinación, serán excluidos.

2.5 Términos de búsqueda y proceso de búsqueda

Para seleccionar los términos de búsqueda y asegurar que se contemplan todas las referencias afines a este objetivo, se ha utilizado un diccionario de sinónimos (Collins, 2018). Además, se han incluido términos utilizados en ciertos trabajos para definir situaciones afines. Por ejemplo, Simatpung (2006) hace referencia a “colaboración” cuando se utilizan medios y esfuerzos para acciones en común, entre dos o más partes en el CdS, con el fin de mejorar respecto de actuar por separado. Albrecht (2010) incide en que para existir “coordinación” se requiere de “colaboración”, aunque Mejias-Sacaluga et al. (2003) comentan que la “coordinación” es un paso previo de la “colaboración”. Del mismo modo, los términos "cooperación" o "integración" son similares a la “coordinación”, aunque cada uno tiene una connotación (Crowston et al., 1994). En la Tabla 2-1 se presenta un resumen de los términos utilizados para la búsqueda.

Tabla 2-1: Tabla de elementos de búsqueda y términos afines.

Elemento de búsqueda	Elementos de búsqueda complementados con términos adicionales afines.
Coordination	("coordination" OR "collaboration" OR "collaborate" OR "cooperation" OR "cooperate" OR "balanced" OR "coordinate" OR "participate" OR "collude" OR "conspire" OR "cooperate" OR "join force" OR "combine")
Mechanism	("mechanism" OR "method" OR "system" OR "technique" OR "procedure" OR "instrument")
Decentral	(decentral OR "asymmetric")
Production	("production" OR "scheduling")
Deterministic	("Integer" OR "deterministic")

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar, se tiene intención de no excluir ningún trabajo afín a la búsqueda que pudiera significar un falso negativo. Las órdenes de búsqueda finales se pueden ver en la Tabla 2-2.

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

Tabla 2-2: Órdenes de las primeras búsquedas utilizadas en cada base de datos.

Web of Science1	<p>TS=(("coordination" OR "collaboration" OR "collaborate" OR "cooperation" OR "cooperate" OR "balanced" OR "coordinate" OR "participate" OR "collude" OR "conspire" OR "cooperate" OR " join force" OR " combine"))</p> <p>AND ("mechanism" OR "method" OR "system" OR "technique" OR "procedure" OR "instrument")</p> <p>AND ("production" OR "scheduling") AND ("deterministic" OR "integer") AND (decentral* OR "asymmetric"))</p> <p>Time frame=2006-2016 Search language=Auto</p>
Scopus1	<p>ALL (("coordination" OR "collaboration" OR "collaborate" OR "cooperation" OR "cooperate" OR "balanced" OR "coordinate" OR "participate" OR "collude" OR "conspire" OR "cooperate" OR " join force" OR " combine"))</p> <p>AND ("mechanism" OR "method" OR "system" OR "technique" OR "procedure" OR "instrument")</p> <p>AND ("production" OR "scheduling") AND ("deterministic" OR "integer") AND (decentral* OR "asymmetric"))</p> <p>AND PUBYEAR > 2005 AND (LIMIT-TO(DOCTYPE, "ar"))</p> <p>AND (LIMIT-TO(LANGUAGE, "English") OR LIMIT-TO(LANGUAGE, "Spanish") OR LIMIT-TO(LANGUAGE, "French"))</p> <p>AND PUBYEAR < 2017</p>

Fuente: Elaboración propia.

Con estas órdenes de búsqueda han quedado preseleccionados 1.143 artículos en Scopus® y 35 en WoS® de los cuáles hay 24 duplicados.

Se entiende que la diferencia entre los dos comandos de búsqueda es debida a la diferencia entre el término “TS” de WoS® que busca los términos “*Searches the Topic fields in all databases in your subscription. Topic fields include Titles, Abstracts, Keywords and Indexing fields such as Systematics, Taxonomic Terms and Descriptors*” (WoS, 2017) y el término “ALL” de Scopus® que busca en los campos “*ABS, AFFIL, ARTNUM, AUTH, AUTHCOLLAB, CHEM, CODEN, CONF, DOI, EDITOR, ISBN, ISSN, ISSUE, KEY, LANGUAGE, MANUFACTURER, PUBLISHER, PUBYEAR, REF, SEQBANK, SEQNUMBER, SRCTITLE, VOLUME, and TITLE*” (Scopus, 2017). Por lo que, se ha decidido definir una segunda búsqueda en WoS® menos restrictiva.

Para ello, a partir de los trabajos seleccionados como relevantes de acuerdo con el objeto de la investigación del primer grupo de preselección, se ha definido una nueva búsqueda en la base de datos de WoS® que preseleccione al menos dichos trabajos. Este segundo rastreo se ha definido mediante la modificación de la orden de búsqueda previa. El análisis de los términos que aparecen en cada uno de los metadatos de las primeras referencias ha permitido redefinir la orden de selección de registros. Se han eliminado filtros “AND” y se han incrementado términos de búsqueda “OR”, con la siguiente propuesta de la Tabla 2-3. Además, como se puede observar, se ha refinado la prospección con la no inclusión de ciertos idiomas y áreas de investigación ajenas a este objetivo. Quedando preseleccionados 2.918 trabajos de la base de datos WoS® con esta segunda orden de búsqueda en Web of Science.

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

Tabla 2-3: Órdenes utilizadas en la segunda búsqueda en WoS®.

```
(TS=("coordination" OR coordinat* OR "collaboration" OR "collaborate" OR "cooperation" OR "cooperate" OR "balanced" OR "coordinate" OR "participate" OR "collude" OR "conspire" OR "cooperate" OR "join force" OR "combine" OR separate* OR cluster*))
AND (TS= (mechanism* OR "method" OR "system" OR "technique" OR "procedure" OR "instrument" OR "algorithm" OR method*))
AND (TS= ("production" OR "scheduling" OR "sequence"))
AND (TS= (decentral* OR "asymmetric" OR "asymmetry" OR interchang* OR separate* OR decouple* OR exchang*))
AND (PY=(2006-2016))
AND (SU=(Engineering OR Mathematics OR "Operations Research & Management Science" OR "Computer Science" OR "Automation & Control Systems" OR Agriculture OR Forestry))
Refined by: RESEARCH AREAS: ( ENGINEERING OR AGRICULTURE OR FORESTRY OR MATHEMATICS OR COMPUTER SCIENCE OR OPERATIONS RESEARCH MANAGEMENT SCIENCE OR AUTOMATION CONTROL SYSTEMS )
AND [excluding] Databases: ( MEDLINE ) AND DOCUMENT TYPES: ( ARTICLE )
AND [excluding] RESEARCH AREAS: ( VETERINARY SCIENCES OR GASTROENTEROLOGY HEPATOLOGY OR SPECTROSCOPY OR PLANT SCIENCES OR MICROBIOLOGY OR IMMUNOLOGY OR PATHOLOGY OR NUCLEAR SCIENCE TECHNOLOGY OR EVOLUTIONARY BIOLOGY OR ENTOMOLOGY OR CRYSTALLOGRAPHY OR ENDOCRINOLOGY METABOLISM OR ANATOMY MORPHOLOGY OR EDUCATION EDUCATIONAL RESEARCH OR ROBOTICS OR PARASITOLOGY OR REPRODUCTIVE BIOLOGY OR OCEANOGRAPHY OR THERMODYNAMICS OR PHYSICAL GEOGRAPHY OR PHYSICS OR POLYMER SCIENCE OR ASTRONOMY ASTROPHYSICS OR DEVELOPMENTAL BIOLOGY OR REMOTE SENSING OR BIOCHEMISTRY MOLECULAR BIOLOGY OR METALLURGY METALLURGICAL ENGINEERING OR PSYCHOLOGY OR GENETICS HEREDITY OR MINING MINERAL PROCESSING OR SOCIAL ISSUES OR MARINE FRESHWATER BIOLOGY OR PHYSIOLOGY OR GEOLOGY OR PALEONTOLOGY OR BIODIVERSITY CONSERVATION OR PUBLIC ENVIRONMENTAL OCCUPATIONAL HEALTH OR NEUROSCIENCES NEUROLOGY OR MYCOLOGY OR NUTRITION DIETETICS OR CARDIOVASCULAR SYSTEM CARDIOLOGY OR MINERALOGY OR ZOOLOGY OR GEOCHEMISTRY GEOPHYSICS OR ARCHAEOLOGY OR BIOTECHNOLOGY APPLIED MICROBIOLOGY OR GEOGRAPHY OR DERMATOLOGY OR TOXICOLOGY OR HISTORY OR METEOROLOGY ATMOSPHERIC SCIENCES OR PHARMACOLOGY PHARMACY OR SOCIOLOGY OR MATHEMATICAL COMPUTATIONAL BIOLOGY OR BIOPHYSICS OR FISHERIES OR HEALTH CARE SCIENCES SERVICES OR RADIOLOGY NUCLEAR MEDICINE MEDICAL IMAGING OR FILM RADIO TELEVISION OR OPTICS OR ANTHROPOLOGY OR WATER RESOURCES OR GOVERNMENT LAW OR URBAN STUDIES OR TELECOMMUNICATIONS OR SURGERY OR LIFE SCIENCES BIOMEDICINE OTHER TOPICS OR IMAGING SCIENCE PHOTOGRAPHIC TECHNOLOGY OR MICROSCOPY OR ACOUSTICS OR ELECTROCHEMISTRY OR CELL BIOLOGY OR ANESTHESIOLOGY OR INFECTIOUS DISEASES )
AND [excluding] DOCUMENT TYPES: ( EDITORIAL OR RETRACTED PUBLICATION OR OTHER OR MEETING OR ABSTRACT OR REPORT OR BOOK )
AND [excluding] LANGUAGES: ( GERMAN OR CHINESE OR UKRAINIAN OR KOREAN OR POLISH OR TURKISH OR RUSSIAN OR CROATIAN OR SERBO CROATIAN OR SLOVENIAN OR PORTUGUESE OR JAPANESE OR UNSPECIFIED OR SERBIAN )
Timespan: 2006-2016. Search language=Auto
```

Fuente: Elaboración propia.

Además, con el fin de asegurar que han sido seleccionados todos los artículos afines, se realiza una nueva búsqueda siguiendo una nueva estrategia. Esta nueva prospección identifica las referencias que hayan incluido el trabajo con el que se ha iniciado esta revisión de los mecanismos de coordinación de Stadtler (2007), en las bases de datos de Scopus®, WoS® y Google Scholar®. Con esta búsqueda, 10 trabajos coinciden con la primera búsqueda en Scopus® y se incorporan 95 nuevas referencias de la base de datos Scopus® que se puede apreciar en la Tabla 2-4 en "3ª Scopus". Esta estrategia ha permitido incorporar 10 trabajos obtenidos exclusivamente por esta estrategia de búsqueda que se puede apreciar en la Tabla 2-6. En la Tabla 2-4 se pueden ver todos los artículos preseleccionados y aquellos coincidentes entre las distintas estrategia de búsqueda.

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

Tabla 2-4: Resumen de órdenes de búsqueda, trabajos preseleccionados y los duplicados.

	1ª SCOPUS	1ª WOS	2ª WOS	3ª SCOPUS	3ª WOS	3ª Scholar
1ª SCOPUS	1.143	24	74	10	5	9
1ª WOS	24	35	19	0	0	0
2ª WOS	74	19	2918	6	7	5
3ª SCOPUS	10	0	6	105	62	89
3ª WOS	5	0	7	62	69	60
3ª Scholar	9	0	5	89	60	186

Fuente: Elaboración propia sobre Mendeley©.

Todas estas estrategias de búsqueda dan un total de 4.187 trabajos preseleccionados sin duplicados.

Un vez seleccionadas las referencias, se realiza un esquema visual de las relaciones entre las referencias preseleccionadas a partir de la repetición cruzada de las “*Author keywords*” que se puede apreciar en la Figura 2-1. Esta representación permite identificar agrupaciones de líneas de investigación. Para obtener esta imagen se han seguido los trabajos de Peset-Mancebo et al. (2013) y de Waltman et al. (2010). En esta representación se agrupan las distintas palabras claves de autor que más aparecen repetidas entre las distintas referencias y con qué otras palabras aparecen al mismo tiempo en dichos trabajos. Esta figura es una representación gráfica de los clústeres de concurrencia de las palabras claves de autor entre los distintos trabajos con el programa Pajek 5.01 (Pajek, 2017). Las palabras clave de autor con mayor presencia en los trabajos preseleccionados son: “Supply Chain”, “Collaborative Planning”, “Game Theory”, “Information Sharing”, “Lot Sizing”, “Scheduling”, “Decision Making”, etcétera. Las palabras con más interconexiones representan palabras clave de autor que aparecen más veces conjuntamente en las diferentes publicaciones. Las palabras aisladas y no interconectadas representan posibles líneas futuras de investigación que relacionen estas áreas de conocimiento. Por ejemplo, se puede observar posibles carencias de líneas de investigación entre mecanismos de coordinación en la programación de producción (puntos en rojo) relacionados con las directrices CPF (puntos en rosa), por la falta de líneas de conexión entre las dos agrupaciones de trabajos con estas palabras claves.

2.6 Filtrado de artículos

Los metadatos bibliográficos preseleccionados de las bases de datos a partir de los distintos métodos de búsqueda han sido incorporados a una base de datos dentro de la herramienta Mendeley Desktop® para su revisión. Una vez descargados, el propio programa permite realizar una búsqueda de duplicados antes de iniciar la revisión. Se pasan de las 4.456 referencias obtenidas de cada estrategia de búsqueda a los 4.187 trabajos al eliminar los duplicados.

Para la selección de trabajos, primero se descartan aquellos que por sus títulos se identifica que están fuera del objetivo al cumplir algún criterio de exclusión de los presentados en este capítulo. Si se tienen dudas con la lectura de su título, se leerá su resumen y si aún hay dudas se identificarán para ser descargados los artículos completos posteriormente. De los metadatos pre-seleccionados para leer su artículo, algunos de ellos no podrán ser incluidos por falta de acceso al documento desde nuestra institución y se identificarán como “NO ACCESO”. En la Tabla 2-5 se recoge el número de artículos de las revistas que no han podido ser consultadas por completo de estos 29 trabajos.

En estos dos pasos, se han descartado un total de 3.736 referencias de las 4.187 analizadas. Como se puede observar, se ha tenido la intención de no excluir ningún trabajo afín a la búsqueda que pudiera significar un falso negativo, aunque se hayan preseleccionado tantos falsos positivos. Finalmente, en el caso de tener acceso al artículo completo, se realiza su descarga para que con la lectura preliminar se permita confirmar su selección. Han sido descargados 451 artículos, de los cuales han sido excluidos 405 trabajos, por cumplir algún criterio de exclusión, dejado 46 referencias seleccionadas.

De acuerdo con el tiempo disponible, se realizan auditorías del proceso de identificación y selección de artículos por los colaboradores de la SLR.

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

Tabla 2-5: Revistas de los trabajos a las cuales no se han tenido acceso.

Título de la revista	Nº artículos
International Journal of Production Research	11
International Journal of Logistics Systems and Management	4
European J. of Industrial Engineering	1
International Journal of Computer Integrated Manufacturing	1
International Journal of Industrial and Systems Engineering	1
International Journal of Information Systems and Supply Chain Management	1
International Journal of Information Technology & Decision Making	1
International Journal of Services, Economics and Management	1
International Journal of Systems Science	1
Journal of Southeast University (English Edition)	1
Journal of Systems Engineering and Electronics	1
Journal of the Operational Research Society	1
Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems	1
Operations Research	1
Supply Chain Forum	1
Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics	1

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 2-6 se puede observar la eficacia de las distintas estrategias de búsqueda a partir de los trabajos finalmente seleccionados.

Tabla 2-6: Referencias bibliográficas seleccionadas.

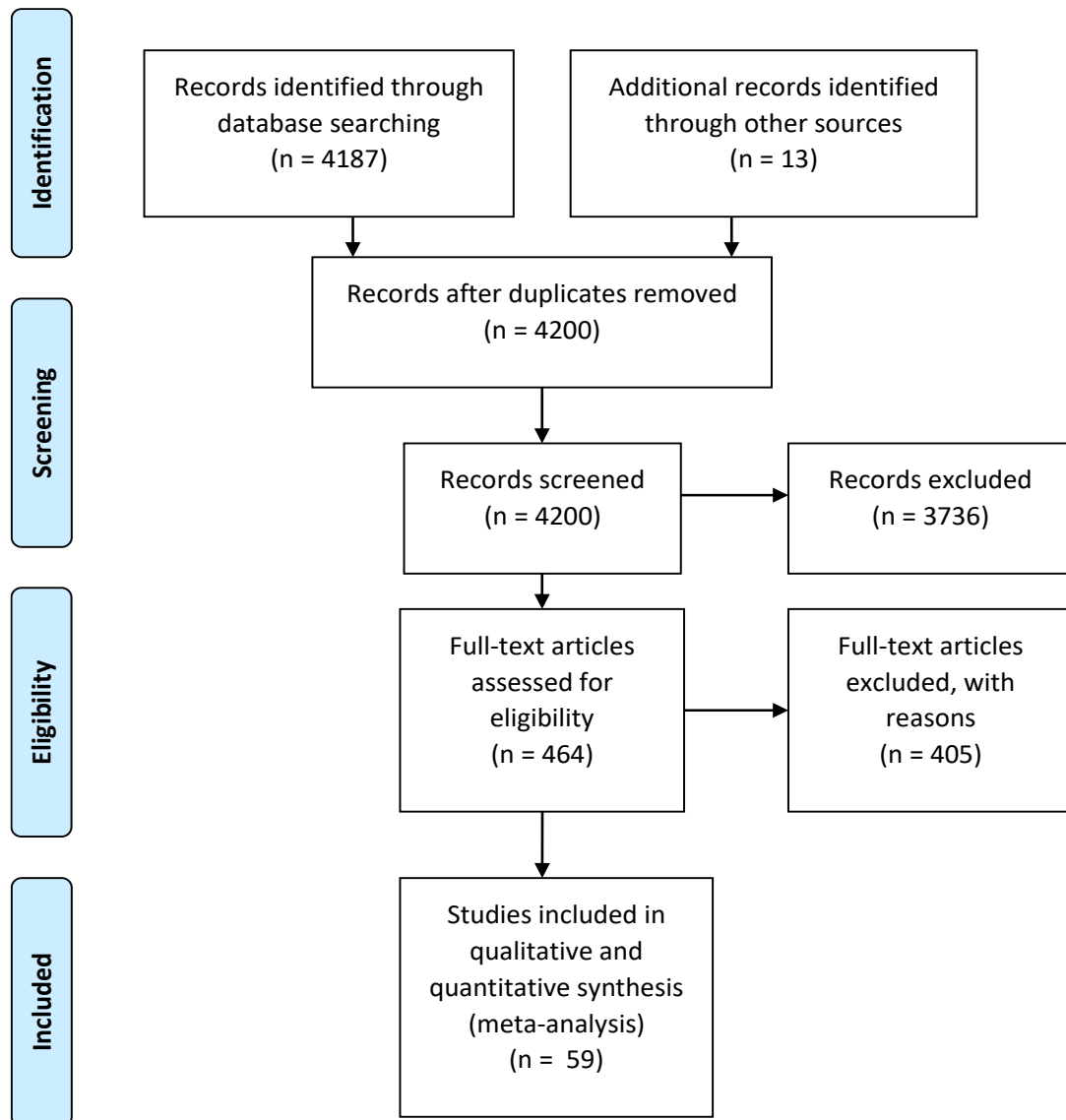
	1º SCOPUS	1º WOS	2º WOS	3º SCOPUS	3º WOS	3º Scholar
1º SCOPUS	25	1	11	1	1	1
1º WOS	1	2	1	0	0	0
2º WOS	11	1	22	2	2	2
3º SCOPUS	1	0	2	12	10	12
3º WOS	1	0	2	10	10	10
3º Scholar	1	0	2	12	10	12

Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, con los 46 trabajos seleccionados se ha realizado una revisión de sus bibliografías. Esta nueva estrategia de prospección permite identificar referencias incluidas en los trabajos seleccionados, pero no identificadas previamente por no cumplir con todos los términos de las órdenes de búsqueda utilizadas.

Mediante esta nueva estrategia de búsqueda se han incorporado 13 trabajos, quedando un total de 59 trabajos seleccionados. En la Figura 2-2 se puede observar un resumen de todo el proceso de gestión de referencias mediante el flujograma propuesto por PRISMA® ("Prisma," 2015).

Figura 2-2: Evolución de las referencias, mediante la forma estandarizada de PRISMA® flow diagram.



Fuente: Forma estandarizada de PRISMA flow diagram®

En la Tabla 2-7 se enumeran los trabajos seleccionados que permitirán realizar el informe con el marco de referencia que se presenta en el apartado siguiente.

Tabla 2-7: Referencias seleccionadas.

(Agnētis et al., 2006)	(Attanasio et al., 2006)	(Dash et al., 2007)	(Dudek et al., 2007)
(Pibernik et al., 2007)	(Pittman et al., 2007)	(Cheng et al., 2008)	(Feng et al., 2008)
(Jung et al., 2008)	(Kelly et al., 2008)	(Nie et al., 2008)	(Nishi et al., 2008)
(Walther et al., 2008)	(Jeong et al., 2009)	(Pukkala et al., 2009)	(Silva et al., 2009)
(Frazzon et al., 2010)	(Gaudreault et al., 2010)	(Gunnerud et al., 2010)	(Hombberger, 2010)
(Hombberger et al., 2010)	(Lee et al., 2010)	(Lehoux et al., 2010a)	(Lehoux et al., 2010b)
(Hombberger et al., 2011)	(Hombberger, 2011)	(Lau et al., 2011)	(Mouret et al., 2011)
(Singh et al., 2011)	(Lu et al., 2012)	(Buer et al., 2013)	(Kovács et al., 2013)
(Taghipour et al., 2013)	(Thomas et al., 2013)	(Ziebuhr et al., 2013)	(Behnamian, 2014)
(Kong et al., 2014)	(Lehoux et al., 2014)	(Reiss et al., 2014)	(Sokoler et al., 2014)
(Thomas et al., 2014)	(Acar et al., 2015)	(Albrecht et al., 2015)	(Buer et al., 2015)
(Eslíkizi et al., 2015)	(Harb et al., 2015)	(Hombberger et al., 2015)	(Mason et al., 2015)
(Qu et al., 2015)	(Thomas et al., 2015)	(Ziebuhr et al., 2015)	(Agnētis et al., 2016)
(Bajgiran et al., 2016)	(Jia et al., 2016)	(Singh et al., 2016)	(Tang et al., 2016b)
(Wenzel et al., 2016b)	(Wenzel et al., 2016b)	(Zoghiami et al., 2016)	

Fuente: Elaboración propia.

2.7 Marco de referencia para la revisión de los trabajos

Una vez que se tienen identificados los artículos seleccionados, se realizará el análisis respecto de cada uno de los elementos del presente marco de referencia. El marco de referencia permitirá analizar las limitaciones de los distintos mecanismos de coordinación e incentivos presentados en los trabajos seleccionados. Estas limitaciones facilitarán identificar posibles oportunidades de líneas de investigación por desarrollar. Este marco de referencia se basa en la combinación de los trabajos de Stadtler (2007) y Mula et al. (2010) con los siguientes apartados, clasificados como internos y externos:

- 2.7.1. Nivel temporal de la decisión coordinada (externo)
- 2.7.2. Estructura y relación entre los miembros de la CdS (externo)
- 2.7.3. Tipo de relación entre los miembros de la CdS (externo)
- 2.7.4. Objetivos de la coordinación (externo)
- 2.7.5. Modelos y pasos en la colaboración (interno)
- 2.7.6. Características de la implantación del mecanismo (interno)
- 2.7.7. Calidad y novedades de las soluciones identificadas(interno)

2.7.1 Nivel temporal de la decisión coordinada (externo)

Las decisiones de coordinación son clasificadas en función de su alcance temporal. Se le denominará estratégico o de largo plazo, de más de 6 meses, a las decisiones tales como la selección de la ubicación de los centros de producción, almacenamiento y distribución, la subcontratación de parte de las operaciones, fijación de precios, aplazamiento, asignación de capacidad, asignación de instalaciones (Huang et al., 2003). Se define como táctico, medio plazo, de 2 semanas a 6 meses, a las decisiones de stock de seguridad, plan de envío, planificación de requerimientos de material y plan de operaciones. Y finalmente, se identificará como operacional, o corto plazo, a las decisiones diarias, las decisiones operacionales de reposición y entrega.

- Estratégico
- Táctico
- Operacional

2.7.2 Estructura y relación entre los miembros de la CdS (externo)

Este elemento del marco de referencia intenta identificar el número de niveles de CdS donde se aplica la propuesta de mecanismos de coordinación. Para clasificar las CdS se recogerán el número de miembros en cada nivel y el área de negocio que se intenta coordinar. También se incluirá si la coordinación es *inter*, entre organizaciones diferentes, o *intra* dentro de una misma organización. Así "2, 1-n, producción, inter" es decir dos niveles, un proveedor con varios clientes y la coordinación es realizada en el área de producción, entre organizaciones diferentes.

- Nº de niveles (1,2... n)
- Nº de miembros por nivel (1-1, 1-n, n-1, n-n, n...)
- Función de negocio (producción, distribución, ventas)
- Intra o Inter

2.7.3 Tipo de relación entre los miembros de la CdS (externo)

Dentro de este elemento del marco de referencia se recogen cinco características de la relación entre los miembros de la CdS. Por un lado, se observará si hay una relación de poder entre los miembros. Además, se analizará si el tipo de comportamiento que se espera entre los miembros, o las asunciones de comportamiento, son oportunista o de equipo. Por otro lado, se observará si se evalúan las posibles consecuencias de los comportamientos oportunistas. En otro orden de ideas, los posibles efectos del aprendizaje en la negociación. Y, por último, si se proponen mecanismos de coordinación o incentivos que se repitan en cada nuevo tramo en el que se planifica.

En la relación de poder, se deberá intentar identificar si hay un desequilibrio de poder en la relación y el lado donde se encuentra. No todos los trabajos hacen mención explícita al concepto, por lo que se intentará, en la medida de las posibilidades, identificarlo.

Respecto al comportamiento, en muchos trabajos se asume el comportamiento colaborativo, conocido también como "de equipo" o cooperativo, aunque no se explicita. Este tipo de

comportamiento se caracteriza en que las unidades organizativas actúan por separado, pero comparten el mismo objetivo y distribuyen información veraz. Esta perspectiva contrasta con una perspectiva más oportunista donde las unidades toman las decisiones separadamente con información privada y objetivos individuales, compartiendo información que no siempre es veraz, dado que velan por asegurar sus objetivos locales. Así mismo, se identificará si se analizan las consecuencias de dicho comportamiento, dado que permite identificar si se avanza en los incentivos adecuados para proveer con información verdadera en la negociación y los factores que influyen en ella (Wang et al., 2016).

Respecto del concepto del aprendizaje en la relación entre los miembros, se desea valorar si se tiene en cuenta dicho factor en los mecanismos de coordinación en las sucesivas negociaciones.

Stadtler (2007) destacó la carencia de trabajos en entornos de horizontes rodantes, donde las negociaciones se repiten en cada nuevo horizonte de negociación y las partes pueden aprender de las negociaciones previas. Dado que en el procedimiento de horizontes rodantes se recalculan las planificaciones multiperiodo en cada nuevo tramo en el que se planifica, las sucesivas negociaciones deben contemplar las repercusiones que tienen los cambios en la planificación respecto de los costes y del nerviosismo generado en las organizaciones. Se debe recordar que los entornos de horizontes rodantes son una realidad habitual en la industria (Stadtler, 2007). En consecuencia, se deberían contemplar el procedimiento de horizontes rodantes en los mecanismos de coordinación si se desea una colaboración cooperativa en la CdS multiperiodo. En este elemento se identificará si los mecanismos de coordinación son contemplados en entornos de horizontes rodantes dentro de modelos multiperiodo, para posteriormente poder evaluar si hay aprendizaje entre cada tramo en el que se planifica.

- Poder (proveedor, comprador..)
- Comportamiento (oportunista, colaborativo...)
- Análisis del oportunismo (si, no)
- Aprendizaje (si, no)
- Horizontes rodantes (si, no)

2.7.4 Objetivos de la coordinación (externo)

Los mecanismos de coordinación se pueden establecer para distintos objetivos. Un primer objetivo es desear la alinealidad de los requerimientos, conseguir que el proveedor pueda satisfacer los requerimientos del cliente. Otro objetivo podría ser buscar una solución óptima a la CdS, es decir, buscar el máximo beneficio o mínimo coste del acumulado de todos los miembros que conformen la CdS, que se obtendría en un cálculo centralizado con toda la información de todas las entidades de la CdS (Pibernik et al., 2007). En estos casos, se debe identificar los mecanismos de compensación entre los miembros, dado que los óptimos globales no siempre son la suma de los óptimos locales. Los peores resultados de unas entidades al coordinarse deben ser compensados con los beneficios globales de la coordinación. Por último, se deben identificar los casos de objetivos de una solución que reparta los beneficios de la coordinación de forma justa. El término justo es muy amplio, se puede interpretar como el reparto de los beneficios o costes en función del riesgo que asume cada eslabón de la CdS en la

cooperación (Vitasek et al., 2013). Pero igualmente el termino riesgo puede referirse a los costes de oportunidad de la cooperación o a los costes que asume cada miembro para realizar esta propuesta de coordinación (Stadtler, 2007), en cada caso se intentará identificar el sentido utilizado.

- Tipo de objetivo (alineación, búsqueda del óptimo, solución justa)

2.7.5 Modelos y pasos en la colaboración (interno)

En este elemento del marco de referencia se analizará el modelo de colaboración. Se identificará el tipo de modelo de matemático utilizado para coordinar. Se indicará la fase en la que se plantea la negociación. Es decir, se identificará que se está en la fase diseño cuando se está colaborando para definir los elementos que conforman la CdS. En la fase de planificación, la colaboración estará centrada en las compras, la producción o en los planes de distribución. En la fase de ejecución, se distinguirá si se modifica el plan propuesto o si se admiten órdenes parciales. Y en la fase de evaluación, se identificará si se evalúan las ejecuciones anteriores en las nuevas negociaciones.

Por otro lado, se recogerá la información que se debe compartir para llegar a una colaboración. Y al mismo tiempo, se recogerá cuál es la información que se oculta. Dado que no se plantean soluciones centralizadas donde un decisor tiene acceso a toda la información relevante para la toma de decisiones, las partes deben definir qué información intercambiar para mejorar su estatus respecto de la no cooperación.

Esto va enlazado con cuál es el objetivo del modelado matemático de la coordinación, si es de incrementar beneficios, minimizar coste, calidad de servicio o reducir atrasos globalmente. Por otro lado, se identificará cual es el objetivo local de cada uno de los miembros que intervienen en la coordinación.

Otro punto que se identificará es la forma utilizada para representar la estructura de las operaciones en los modelos. Las cadenas de suministro son cada vez más complejas con alternativas, co-productos, embalajes comunes, de más fácil representación mediante el concepto de los *strokes* que con las estructuras basadas en Gozinto (Maheut, 2013). Los *strokes* representan cualquier operación de transformar, transportar o consumir y permiten que el modelado pueda optimizar las alternativas de operaciones más adecuadas. La estructura Gozinto es la forma de asociar todos los productos necesarios (producto hijos) y los recursos a inmovilizar, para la obtención de un único producto denominado “producto padre”, es una adaptación lingüística de “*the part that goes into*” (Vazsonyi, 1954).

- Modelo de decisión (lineal, entero, mixto, cuadrático...)
- Fase de colaboración (diseño, planificación, ejecución, evaluación)
- Información oculta (costes, capacidades...)
- Información compartida (costes, capacidades...)
- Objetivo global (beneficios, coste, servicio...)
- Objetivos locales (beneficios, coste, nivel de servicio...)

- Modelado estructura de producto (gozinto, strokes...)

2.7.6 Características de la implantación del mecanismo (internos)

En este elemento del marco de referencia se recoge el mecanismo de coordinación utilizado y sus características. Los mecanismos de coordinación se identificarán como subastas, jerárquicos, descomposiciones matemáticas y metaheurísticas.

Las subastas son importantes mecanismos de coordinación, utilizados desde los primeros tiempos para la asignación de bienes y servicios (Attanasio et al., 2006). La coordinación jerárquica se puede entender como una extensión de las subastas, donde solo una de las partes puja. En los mecanismos de coordinación jerárquicos una entidad informa de su plan de necesidades y las otras entidades pueden ofrecer alternativas con una compensación. La entidad superior evalúa las alternativas o pujas y confirma su plan de necesidades u oferta. Pero estas necesidades pueden ser de varios productos o servicios combinados, lo que se conoce como subastas combinatorias. En las subastas combinatorias las alternativas se incrementan por lo que se incrementa los requerimientos computacionales. Para solucionar dicho problema se identifican dos enfoques. Por un lado, utilizar los distintos métodos de las descomposiciones matemáticas y, por otro lado, aplicar métodos heurísticos con el fin de encontrar la combinación más adecuada al objetivo perseguido.

Los métodos de descomposición matemática permiten que el problema se divida en subproblemas coordinados para encontrar una solución conjunta al problema. Por lo tanto, ofrecen un mecanismo de coordinación alternativo, dado que los subproblemas pueden asimilarse a cada una de las entidades de la CdS y el problema conjunto a la propia CdS.

Los multiplicadores de Lagrange se utilizan para separar el modelo en subproblemas independientes al relajar las restricciones que los conectan. Estos subproblemas se pueden resolver de forma independiente. Dentro de estas descomposiciones se encuentran los métodos propuestos por Dantzig-Wolfe (1960) y la descomposición de Benders (1962). Este último autor propone dualizar la función y luego relajar algunas restricciones para generar subproblemas separables y un problema central. El problema central contiene las restricciones y la parte de la función que no se pueden descomponer. La entidad coordinadora debe agregar las soluciones propuestas de cada subproblema para resolver el problema central. El método de Dantzig-Wolfe (1960) utiliza los multiplicadores de Lagrange para coordinar, aumentando los precios de los recursos compartidos cuando los subproblemas solicitan más recursos. El método de Benders solicita los precios propuestos por los subproblemas para reducir o aumentar los recursos compartidos. Otro planteamiento es la descomposición de Lagrange. La descomposición de Lagrange (DL) propone duplicar un conjunto de variables y relajar estas restricciones que correlacionan estas duplicaciones. Por lo tanto, DL permite dividir los problemas con la duplicación de las variables de conexión (Lidestam et al., 2011). Los problemas divididos por DL permiten la computación paralela (Jeet et al., 2007). Guignard et al. (1987) demostraron que DL establece conjuntos más reducidos de soluciones que aplicando LR.

Además, se evaluará si es necesaria la figura de un mediador. Muchos mecanismos llevan implícita la necesidad de la figura de un mediador, el cual tiene acceso a parte de la información de las entidades. El mediador, de forma ajena y sin predisposición por ninguna de las partes, gestiona la información.

Por otro lado, las negociaciones o búsquedas de soluciones quedan afectadas por las propuestas iniciales que sirven de base para la negociación. Se identificará quien origina o aporta la primera propuesta. Y también se registrarán los planes que hacen falta intercambiar para llegar a una solución.

Además, se anotará si se plantean compensaciones con el fin de poder acercarse al óptimo. Estas compensaciones permiten compensar el empeoramiento de unos al aceptar la propuesta de planificación.

Por último, se identificarán los criterios utilizados para considerar finalizada la negociación. Estos criterios pueden ser una combinación de los siguientes criterios: el número de iteraciones realizadas, el gap requerido, el límite a los tiempos computacionales y los propios parámetros definidos en la metaheurística.

- Mecanismo (subasta, jerárquico, descomposición matemática, metaheurísticos)
- Mediador (sí, no)
- Solución inicial (aguas arriba, aguas abajo, mediador...)
- Nº de planes intercambiados (1,2,... pocos, muchos)
- Pagos compensatorios (sí, no)
- Criterios de finalización de la negociación (iteraciones, gap...)

2.7.7 Novedades de las soluciones identificadas

En este apartado se recogerá la forma en que los trabajos evalúan las soluciones propuestas. Se identificará la calidad de los resultados en función de si aportan una demostración de la convergencia del método, realizan la simulación de un caso de estudio, o parten de un banco de instancias, dado que la evidencia del método se circunscribirá a esta situación.

Por otro lado, se intentará recoger la aportación destacable que cada investigación aporta sobre los mecanismos de coordinación o a los incentivos aplicados.

- Evaluación de la calidad de la propuesta (demostración, simulación, banco de instancias)
- Aportación destacable

2.8 Conclusiones

En este capítulo se ha presentado un protocolo para la realización del SLR y el marco de referencia para el análisis de los artículos seleccionados. En dicho protocolo se han tenido que tomar decisiones, descartando alternativas que abren posibilidades a futuras líneas de investigación. El elemento básico del SLR es que el proceso sea sistemático, transparente y

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

replicable. Para ello el proceso utilizado esta predeterminado antes de su inicio, compartido y auditado por el equipo de investigación.

En el momento de inicio de la revisión, a finales del 2016, no todos los trabajos estaban incorporados en las bases de datos. Por lo tanto, se han ido haciendo actualizaciones de las búsquedas con el paso del tiempo para poder incorporar las nuevas referencias bibliográficas a medida que avanzaba el trabajo.

En la Tabla 2-6 se puede observar la eficacia de las distintas estrategias de búsqueda. Se puede destacar que la primera estrategia de búsqueda logra mayor número de trabajos seleccionados, pero a costa de un mayor número de trabajos analizados. Habría que destacar la revisión de las bibliografías por el número de artículos seleccionados respecto de los artículos analizados. Pero, para una completa revisión bibliográfica ambos métodos deben completarse, dada la dificultad de determinar correctamente los términos de búsqueda, para que no generen falsos negativos y al mismo tiempo el número de trabajos preseleccionados sea asumible.

Hay que mencionar que siempre hay un posible error humano en la revisión de los trabajos preseleccionados, pese a las auditorías y revisiones, que pueden haber descartado ciertos trabajos, pero al compartir el protocolo se garantiza que el proceso sea sistemático, transparente y replicable.

Se han excluido los mecanismos de coordinación referidos a las áreas de economía, la teoría de juegos, modelados del vendedor de periódicos, protocolos de contratos o las demandas dependientes de los precios que permiten abrir futuras líneas de investigación que una estas áreas con los mecanismos de coordinación del área de operaciones. Además, se han excluido los trabajos de líneas de investigación centradas en la programación en base a agentes, pero que puede abrir posibilidades para trasladar los mecanismos de coordinación de operaciones en su aplicación automatizada al asimilar los agentes a las entidades de la CdS.

En la Tabla 2-7 se enumeran los trabajos seleccionados que permitirán realizar el informe con el marco de referencia del apartado anterior en el siguiente capítulo.

Capítulo 3: Revisión sistemática de literatura sobre los mecanismos de coordinación en modelos de programación matemática para la toma de decisiones descentralizada²

3.1 Introducción

Las CdS son cada vez más complejas y distribuidas, compuestas por múltiples organizaciones con diferentes objetivos y políticas. Por lo tanto, la CdS debe coordinar su actividad para mejorar su competitividad aún cuando los usuarios finales no necesitan conocer la ubicación o las características de los recursos requeridos (Attanasio et al., 2006).

Desde la primera aparición del concepto CdS en 1982 (Cooper et al., 1997), se identificó que la competencia no era tanto entre las empresas, sino entre las distintas CdS, que debían coordinarse. De hecho, las organizaciones tienen que gestionar la mejora entre los miembros de CdS. Por lo tanto, es necesario vincular los objetivos y las actividades entre las organizaciones de la CdS, para lograr la optimización global, en lugar de buscar solo la optimización de los resultados locales.

La coordinación puede ser entre empresas independientes de la CdS o dentro de los clústeres (Qu et al., 2015) o incluso dentro de cada organización (Behnamian, 2014). Stank (1999) estudió los procesos de coordinación dentro de las empresas, que se caracterizaron por una comunicación efectiva, intercambio de información, asociación y monitorización del desempeño. Dado que la información no está igualmente disponible para todas las partes, es decir, es asimétrica, se necesitan mecanismos para garantizar que la información esencial se comparte para tomar las decisiones correctas (McAfee et al., 1987).

La coordinación no solo es necesaria cuando las fábricas se encuentran en lugares diferentes o con culturas diferentes (Maheut et al., 2014a), sino también entre diferentes periodos de tiempo (Maheut et al., 2014b). Estos y otros elementos afectan en la toma de decisiones sobre la ubicación de almacenamiento y distribución, los programas de producción o distribución, etc. Además, se pueden involucrar diferentes niveles dentro de las organizaciones que constituyen

² Una versión previa de este capítulo fue presentada en el *11th International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management* celebrado en Valencia en 2017 recibiendo el reconocimiento como *Best Paper Award* en el área de *Operation Research, Modelling and Simulation*. Y ha servido para la realización de un artículo científico "*Coordination mechanisms with mathematical programming models for decentralized decision-making, a literature review*", publicado en la revista "*Central European Journal of Operations Research (CEJOR)*" (Rius-Sorolla et al., 2018b).

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

la CdS, los cuales deben estar igualmente coordinados. Todos ellos, con el objetivo de tomar decisiones operativas óptimas para su organización y también para la CdS (Ertogral et al., 2000).

Los mecanismos de coordinación distribuidos en situaciones asimétricas son necesarios en organizaciones donde los sistemas de decisión centralizados son impracticables porque su modelado es no-lineal e intratable, dada la complejidad de sus instalaciones (Lu et al., 2012). Igualmente, en las organizaciones que requieren sistemas de toma de decisión en tiempo real (Ouelhadj et al., 2009) o cuando las organizaciones son reticentes a compartir toda la información necesaria para la toma de decisiones en la CdS (Kutanoglu et al., 1999), los mecanismos de coordinación ayudan a identificar soluciones.

Sahin y Robinson (2002) examinando la literatura sobre integración en la CdS propusieron que el intercambio de información y la coordinación entre los miembros eran los principales impulsores del desempeño de la CdS. La gestión efectiva de la información puede generar una notable mejora en la CdS (Zhou et al., 2007). Algunos trabajos muestran la correlación entre la mejora de beneficios y el intercambio de información y/o el alineamiento de incentivos y/o la sincronización de decisiones (Sridharan et al., 2009).

Para asegurar la coordinación, se han creado contratos o mecanismos (Whang, 1995) que permiten tomar decisiones localmente, es decir, donde sea que la información esté disponible, pero teniendo en cuenta los intereses globales. La presente tesis se centra en los mecanismos que permiten la planificación local autónoma y al mismo tiempo alinean los intereses globales a través de modelos de programación matemática.

Estos mecanismos deben ser los adecuados para alinear los objetivos entre los diferentes actores (Fan et al., 2003). Entre ellos se encuentran repartos proporcionales de los beneficios globales (Ben-Daya et al., 2008), precios de transferencia, recompra, entrega flexible y reembolso (Mahdiraji et al., 2015), descuento por cantidad (Lehoux et al., 2014), periodos de crédito (Arkan et al., 2012), compartir el riesgo, flexibilizar las cantidades de entrega (Jeong, 2012), derechos de franquicia (Chakraborty et al., 2015) etc. La colaboración solo continuará si se percibe que la cooperación trae beneficios o mayor valor a cada parte (Cheng, 2011). Una solución totalmente integrada puede dar como resultado un rendimiento óptimo para el sistema (Buxmann et al., 2008), pero tal solución no siempre beneficia a cada miembro del sistema (Li et al., 2007). Por lo tanto, aunque en teoría la mejor solución significa la óptima, en la práctica con que los resultados de la coordinación hayan mejorado el resultado general en comparación con la falta de coordinación (Stadtler et al., 2008) deben considerarse como mecanismos de coordinación.

Desde los trabajos de Dantzig-Wolfe (1960) y Benders (1962), se han ideado diferentes soluciones con respecto a la coordinación de la CdS. Pudiéndose encontrar importantes revisiones sobre la literatura (Arshinder et al., 2008, 2011; Badole et al., 2012; Frayret et al., 2009; Jeong et al., 2002; Kumar et al., 2016; Li et al., 2007; Tang et al., 2016a) que analizan diferentes percepciones sobre el concepto de coordinación y de CdS. Entre todas se destaca la revisión de la literatura de Stadtler (2007) por su enfoque centrado en los mecanismos de

coordinación de la programación matemática. Y es por eso que se va a comenzar la investigación a partir de 2006, centrándose en la coordinación con mecanismo de coordinación basados en la programación matemática, tal y como se ha visto en el protocolo presentado en el capítulo anterior.

La principal contribución de este capítulo es presentar una revisión de los artículos relacionados con los mecanismos de coordinación sobre programación matemática en los últimos 10 años y revisados siguiendo el marco de referencia presentado en el capítulo anterior.

El resto del capítulo está estructurado de la siguiente manera: primero, se presenta una breve descripción del proceso de revisión; segundo, se presenta una breve discusión de los resultados; finalmente, el capítulo termina con una conclusión y líneas futuras de investigación.

3.2 Proceso de revisión

La revisión se llevó a cabo siguiendo el protocolo sistemático de revisión de la literatura presentado por Rius-Sorolla et al. (2017) y una ampliación del mismo se puede encontrar en el capítulo anterior.

Al aplicar dicho protocolo se han seleccionado un total de 59 artículos para su revisión. La mayoría de los artículos se han encontrado en revistas (89,7%), el resto en publicaciones de congresos (10,3%) (ver Tabla 3-2). 6 revistas representan el 39,7% de las citas: International Journal of Production Economics, International Journal of Production Research Computers & Chemical Engineering, European Journal of Operational Research, IEEE Transactions on Automation Science and Engineering and Operations Research. La Tabla 3-1 muestra la distribución de las fechas de publicación de los artículos respecto de los mecanismos de coordinación aplicados. En los 59 artículos revisados, 18 se basan en la descomposición Lagrangiana (LR) con diferentes heurísticas para actualizar el multiplicador, 13 utilizan diferentes Metaheurísticas (MH) para encontrar situaciones de coordinación, 16 utilizan un protocolo jerárquico (HBP), 7 utilizan el método Dantzig-Wolfe (DW) (1960), 4 utilizan un mecanismo de subasta (AM) para actualizar la asignación y 1 utiliza el método de Benders (1962).

Tabla 3-1: Mecanismo de coordinación de las referencias seleccionadas.

Mecanismo	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	Total
Benders									1			1
AM	1	1				1					1	4
DW		1	1		1				1	3		7
HBP	1	1	3		4			2	1	1	3	16
MH		1		1	2	2		2	1	4		13
LR			3	2	1	2	1	1	2	2	4	18
Total	2	4	7	3	8	5	1	5	6	10	8	59

Benders enfoque de descomposición de Benders (1962), AM mecanismos de subasta, DW como Dantzig-Wolf (1960), HBP Protocolo basado en la jerarquía, MH Metaheurístico LR Descomposición de Lagrangian

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

Tabla 3-2: Revista o conferencia de las referencias seleccionadas.

Publicación	Referencias	% Total
International Journal of Production Economics	9	15%
International Journal of Production Research	4	7%
Computers & Chemical Engineering	3	5%
European Journal of Operational Research	3	5%
Computers & Industrial Engineering	2	3%
IEEE Transactions on Automation Science and Engineering	2	3%
Operations Research Letters	2	3%
2010 International Conference on Systems Sciences	1	2%
2010 World conference on Transport Research	1	2%
2013 International Conference on Advanced Logistics and Transport, ICALT 2013	1	2%
2014 IEEE Computational Intelligence in Production and Logistics Systems	1	2%
2015 48th Hawaii International Conference on System Sciences	1	2%
2015 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (IEEE Ssci)	1	2%
2016 European Control Conference, ECC 2016	1	2%
Agricultural Systems	1	2%
Applied Soft Computing	1	2%
Automatisierungstechnik	1	2%
Building and Environment	1	2%
Canadian journal of forest	1	2%
Computers and Chemical Engineering	1	2%
Discrete Applied Mathematics	1	2%
Electronic Commerce Research	1	2%
European J. of Industrial Engineering	1	2%
Forest Science	1	2%
IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics	1	2%
IFAC-Papers Online	1	2%
International Journal of Computer Integrated Manufacturing	1	2%
International Journal of Industrial Engineering: Theory Applications and Practice	1	2%
International Journal of Information Processing and Management	1	2%
International Journal of Information Technology & Decision Making	1	2%
International Journal of Shipping and Transport Logistics	1	2%
International Transactions in Operational Research	1	2%
Journal of Engineering and Technology Management	1	2%
Journal of Manufacturing Systems	1	2%
Journal of Operations Research Quarterly	1	2%
Journal of Process Control	1	2%
Journal of the Operational Research Society	1	2%
Lecture Notes in Computer Science	1	2%
Logistics Management	1	2%
Parallel Computing	1	2%
Production Planning & Control	1	2%

Fuente: Elaboración propia.

3.3 Mecanismos de coordinación desde el marco de referencia externo

En el capítulo anterior, se ha presentado el marco de referencia para analizar los diferentes mecanismos de coordinación presentados en los trabajos seleccionados. Los apartados del marco de referencia son agrupados en internos y externos. Los apartados del marco de referencia externos permiten evaluar los mecanismos de coordinación desde un punto de vista externo al propio mecanismo de coordinación, como el nivel temporal de las decisiones de coordinación, la estructura y relación entre los miembros de la CdS y los objetivos que se tienen para esa coordinación. A continuación, se presenta el análisis de los trabajos seleccionados al aplicar los apartados del marco de referencia externo.

3.3.1 Nivel temporal de la toma coordinada de decisiones

Los niveles de las decisiones identificados de los artículos seleccionados se agrupan en:

- Estratégico
- Táctico
- Operacional

En los 59 documentos, los plazos o el nivel de las decisiones no siempre son definidos por los autores. Albrecht et al. (2015) presentan una propuesta para un mecanismo de coordinación genérico para Ventas y Planificación de Operaciones (S&OP), que podría ser tanto de nivel estratégico como táctico, pero se opta por el táctico ya que actúan más en la planificación de producción (ver Tabla 3-3). Un caso particular es el trabajo de Feng et al. (2008) que aparece como estratégico, táctico y operacional. Este trabajo presenta una coordinación de una empresa de tableros de fibra orientada de Quebec (Canadá) con varias plantas y centros logísticos entre comercial-producción y distribución-compra, tomando decisiones en todos los niveles temporales. Por un lado, se encuentran decisiones estratégicas como la asignación de capacidad a las distintas plantas de molinos en Canadá y EEUU o los proveedores seleccionados en cada periodo. Pero, por otro lado, llegan a decisiones operacionales de decidir las entregas a los clientes. Los niveles temporales de la toma de decisiones identificados en los trabajos son recogidos en la Tabla 3-3.

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

Tabla 3-3: Nivel temporal de la toma coordinada de decisiones en los trabajos seleccionados.

Referencia	Estratégico	Táctico	Operacional
(Agnētis et al., 2006)			x
(Attanasio et al., 2006)			x
(Dash et al., 2007)		x	
(Dudek et al., 2007)		x	
(Pibernik et al., 2007)		x	
(Pittman et al., 2007)		x	
(Cheng et al., 2008)			x
(Feng et al., 2008)	x	x	x
(Jung et al., 2008)			x
(Kelly et al., 2008)			x
(Nie et al., 2008)		x	
(Nishi et al., 2008)			x
(Walther et al., 2008)		x	
(Jeong et al., 2009)			x
(Pukkala et al., 2009)		x	
(Silva et al., 2009)		x	x
(Frazzon et al., 2010)			x
(Gaudreault et al., 2010)		x	
(Gunnerud et al., 2010)			x
(Homberger, 2010)		x	
(Homberger et al., 2010)		x	
(Lee et al., 2010)		x	
(Lehoux et al., 2010a)		x	
(Lehoux et al., 2010b)		x	
(Homberger et al., 2011)		x	
(Homberger, 2011)		x	
(Lau et al., 2011)			x
(Mouret et al., 2011)			x
(Singh et al., 2011)			x
(Lu et al., 2012)	x	x	
(Buer et al., 2013)		x	
(Kovács et al., 2013)		x	
(Taghipour et al., 2013)		x	
(Thomas et al., 2013)		x	
(Ziebuhr et al., 2013)		x	
(Behnamian, 2014)		x	x
(Kong et al., 2014)	x	x	
(Lehoux et al., 2014)		x	
(Reiss et al., 2014)		x	
(Sokoler et al., 2014)			x
(Thomas et al., 2014)		x	x
(Acar et al., 2015)		x	x
(Albrecht et al., 2015)		x	
(Buer et al., 2015)		x	
(Eslkizi et al., 2015)		x	
(Harb et al., 2015)		x	

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

(Hombberger et al., 2015)	x	
(Mason et al., 2015)	x	
(Qu et al., 2015)	x	
(Thomas et al., 2015)	x	x
(Ziebuhr et al., 2015)	x	
(Agnētis et al., 2016)	x	x
(Bajgiran et al., 2016)	x	
(Jia et al., 2016)	x	
(Singh et al., 2016)	x	x
(Tang et al., 2016b)		x
(Wenzel et al., 2016a)		x
(Wenzel et al., 2016b)		x
(Zoghiami et al., 2016)	x	

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la Tabla 3-3, solo 4 de los estudios consideran la coordinación en decisiones a largo plazo, donde 2 de ellos están relacionados con problemas forestales y la industria de la madera (Feng et al., 2008; Kong et al., 2014) ya que los periodos de crecimiento forestal óptimo son alrededor de 25 años. En otro trabajo con decisiones a largo plazo, Lu et al. (2012) plantean un problema de localización, con una coordinación libre de mediadores basada en el sistema inmune humano. Los emplazamientos son asignados a cada empresa según las necesidades de cada una de ellas, en un proceso de negociación entre las mismas simulando al sistema inmunológico. En el último de estos 4 trabajos con decisiones a largo plazo, Qu et al. (2015) resuelven un problema de configuración de un clúster mediante el método de *Lagrange Aumentado*, donde el multiplicador de Lagrange es actualizado mediante una función cuadrática. La estructura de proveedores dentro del clúster es una combinación entre proveedores habituales y proveedores puntuales.

3.3.2 Estructura y relación entre los miembros de la CdS

Las características de las estructuras y relación entre los miembros de la CdS identificados de los artículos seleccionados, se puede observar en la Tabla 3-4 y se agrupan en:

- Nº de niveles (1,2... n)
- Nº de miembros por nivel (1-1, 1-n, n-1, n-n, n...)
- Función de negocio (producción, distribución, ventas)
- Intra o inter

La estructura de la CdS es uno de los factores principales en la complejidad de alinear los planes de las diferentes organizaciones para lograr la coordinación (Stadtler, 2007). Tal complejidad influirá en el tipo de información compartida, la generación de confianza y la calidad de la información compartida. Se define la estructura de la CdS (ver Tabla 3-4) por el número de niveles, miembros en cada nivel, el área de negocios que se coordinará y si la coordinación se realiza entre diferentes organizaciones *inter* o dentro de la misma organización *intra*.

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

Tabla 3-4: Estructura y relación entre los miembros de la CdS en los trabajos seleccionados.

Referencia	Nº de niveles	Nº of miembros por nivel	Función de negocio	Intra o inter
(Agnētis et al., 2006)	2	1-n	Prod	Inter
(Attanasio et al., 2006)	2	n-1	Prod	Inter
(Dash et al., 2007)	2	n-n	Prod	Inter
(Dudek et al., 2007)	2	1-n	Prod	Inter
(Pibernik et al., 2007)	2	n-n	Prod, distr	Inter
(Pittman et al., 2007)	1	n	Prod	Intra
(Cheng et al., 2008)	1	n	Prod	Intra
(Feng et al., 2008)	3	n-n-n	Prod, distr, sales	Intra
(Jung et al., 2008)	2	1-1	Prod, distr	Inter
(Kelly et al., 2008)	2	n-n	Prod	Intra
(Nie et al., 2008)	n	n	Prod	Inter
(Nishi et al., 2008)	2	1-n	Prod	Inter
(Walther et al., 2008)	2	n-1	Prod, distr	Inter
(Jeong et al., 2009)	1	1-1	Prod	Intra
(Pukkala et al., 2009)	1	n	Prod	Intra
(Silva et al., 2009)	2	n-1	Prod, distr	Inter
(Frazzon et al., 2010)	2	1-1	Prod, distr	Inter
(Gaudreault et al., 2010)	3	1-1-1	Prod	Intra
(Gunnerud et al., 2010)	1	n	Prod	Intra
(Hombberger, 2010)	n	1-1-1	Prod	Inter
(Hombberger et al., 2010)	n	1-1-1	Prod	Inter
(Lee et al., 2010)	2	1-n	Distr	Inter
(Lehoux et al., 2010a)	2	1-1	Prod, distr	Inter
(Lehoux et al., 2010b)	2	1-1	Prod, distr	Inter
(Hombberger et al., 2011)	n	1-1-1	Prod	Inter
(Hombberger, 2011)	n	1-1-1	Prod	Inter
(Lau et al., 2011)	1	1-n	Prod	Intra
(Mouret et al., 2011)	1	1-1	Prod	Intra
(Singh et al., 2011)	2	1-n	Prod	Inter
(Lu et al., 2012)	1	n	-	-
(Buer et al., 2013)	n	1-1-1	Prod	Inter
(Kovács et al., 2013)	2	1-1	Prod	Inter
(Taghipour et al., 2013)	2	1-1	Prod	Inter
(Thomas et al., 2013)	2	1-n	Prod, distr	Inter
(Ziebuhr et al., 2013)	n	1-1-1	Prod	Inter
(Behnamian, 2014)	2	n-1	Prod, distr	-
(Kong et al., 2014)	2	1-n	Prod, distr	Intra
(Lehoux et al., 2014)	2	1-1	Prod, distr	Inter
(Reiss et al., 2014)	n	1-1-1	Prod	Inter
(Sokoler et al., 2014)	1	1-n	Prod	-
(Thomas et al., 2014)	2	1-n	Prod, distr	Inter
(Acar et al., 2015)	2	n-n	Prod, distr	Intra
(Albrecht et al., 2015)	2	n-1	Prod	-
(Buer et al., 2015)	2	n-1	Prod	Inter
(Eslíkizi et al., 2015)	2	n-1	Prod	Inter

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

(Harb et al., 2015)	2	n-1	Prod	Inter
(Hombberger et al., 2015)	n	1-1-1	Prod	Inter
(Mason et al., 2015)	2	n-1	Prod	Inter
(Qu et al., 2015)	2	n-1	Prod	Inter
(Thomas et al., 2015)	2	1-n	Prod, distr	Inter
(Ziebuhr et al., 2015)	2	n-1	Prod	Inter
(Agnētis et al., 2016)	2	1-1	Prod, distr	Inter
(Bajgiran et al., 2016)	3	1-n-n	Prod, distr	Inter
(Jia et al., 2016)	2	1-1	Prod, distr	Inter
(Singh et al., 2016)	2	n-1	Prod	Inter
(Tang et al., 2016b)	1	n	Prod	Intra
(Wenzel et al., 2016a)	2	1-n	Prod	Intra
(Wenzel et al., 2016b)	2	1-n	Prod	Intra
(Zoghlami et al., 2016)	2	1-n	Prod	Inter

n número de miembros, 1-1 un miembro en cada nivel *n-n* número de miembros en cada nivel, *prod* producción, *distr* distribución, - desconocido, *intra* dentro de la entidad, *inter* entre entidades de diferentes organizaciones.

De los artículos, se puede destacar los pocos trabajos de *intra* coordinación, un 28%, tal y como se puede observar de la Tabla 3-4. Esta coordinación *intra* se presenta en empresas donde la planificación centralizada no es adecuada, debido al volumen de información y el mantenimiento de la información (Araujo et al., 2007) o la necesidad de reaccionar en tiempo real a los cambios (Ouelhadj et al., 2009). En estas empresas, la planificación distribuida es necesaria para tomar decisiones localmente coordinadas con el resto de la organización. Dentro de estos trabajos, se encuentran varios casos de empresas petroquímicas multicentro (Gunnerud et al., 2010; Mouret et al., 2011), otros en la industria de la madera (Feng et al., 2008; Gaudreault et al., 2010; Pukkala et al., 2009) y el caso de una coordinación en tiempo real de sistemas de control distribuidos (Cheng et al., 2008).

Con respecto al número de niveles coordinados dentro de la CdS, la mayoría de los trabajos se enfocan en dos niveles que se puede apreciar en la Tabla 3-4. Luego, se identifican aquellos trabajos que corresponden con *n* en la columna del número de niveles, donde el número de niveles involucrados no se puede delimitar. Pero, se han identificado solo tres trabajos de coordinación entre tres niveles de la CdS (Bajgiran et al., 2016; Feng et al., 2008; Gaudreault et al., 2010). Los tres trabajos con tres niveles de coordinación están dentro de la industria de la madera que se puede observar en la Tabla 3-6.

Si se observa el número de miembros por nivel junto con el número de niveles coordinados, se puede entender que la colaboración más simple es aquella que se establece entre dos niveles y dos agentes, una entidad en cada nivel, 1-1 (Jeong et al., 2009; Jia et al., 2016). El siguiente nivel de complejidad es considerar situaciones de varias entidades, 1-*n*, un proveedor con varios clientes, que sería una CdS denominada divergente (Dudek et al., 2007; Zoghlami et al., 2016). También se pueden incluir los casos *n-1*, donde varios proveedores dan servicio a un único cliente, que sería una CdS convergente (Wenzel et al., 2016a, 2016b). También deberían incluirse los casos *intra* compañía, donde no hay un cliente o proveedor. En estos casos es necesario la coordinación dentro de las organizaciones. En esta situación se encuentra la negociación entre

distintos centros de trabajo para realizar las tareas necesarias para el cumplimiento de los pedidos, tal y como es propuesto por Ziebuhr et al. (2013). Las subastas entre trabajos para la programación de producción (Tang et al., 2016b) es otro caso. Y otra situación es cuando varios agentes tienen que ponerse de acuerdo sobre cómo compartir un recurso común sin la figura de un coordinador o mediador (Lu et al., 2012).

Las situaciones identificadas como *n-n*, hacen referencia a cuando varios proveedores y varios clientes buscan coordinar sus necesidades conjuntamente, por ejemplo a través de una subasta (Dash et al., 2007). También se incluye a empresas en red que se coordinan para establecer una CdS (Acar et al., 2015). Dentro de esta situación está también la coordinación de las empresas dentro de un clúster (Qu et al., 2015). Además, aquellos casos donde las unidades de fabricación deben coordinarse con varias unidades de logística (Pibernik et al., 2007), son también identificados como *n-n*.

Respecto de las áreas de negocio afectadas, las propuestas de coordinación pueden referirse a problemas de producción (Tang et al., 2016b), como los relacionados con la asignación de tareas o capacidad. En otros casos, los trabajos se centran en problemas de coordinación de la producción con otras áreas de las organizaciones, como la distribución y las ventas (Feng et al., 2008). Y otro problema estudiado es sobre la coordinación de las plantas productivas con sus proveedores de servicios logísticos, en varios de estos casos con un 3PL (Agnētis et al., 2016; Jia et al., 2016; Jung et al., 2008).

3.3.3 Tipo de relación entre los miembros de la CdS

Las características del tipo de relación entre los miembros de la CdS identificados de los artículos seleccionados se agrupan en:

- Poder (proveedor, comprador...)
- Comportamiento (oportunista, colaborativo...)
- Análisis del oportunismo (sí, no)
- Aprendizaje (sí, no)
- Horizontes rodantes (sí, no)

En este apartado, se analiza el tipo de relación de los agentes dentro de la CdS. Dentro de la relación se incluye el análisis del comportamiento, la necesidad de generar confianza para facilitar la coordinación (Manrodt et al., 2004), o la búsqueda de herramientas que permitan verificar que la información compartida sea correcta sin ningún tipo de oportunismo.

El poder en la coordinación es un elemento importante en la relación entre los miembros de la CdS, tiene un importante efecto disuasorio en la generación de confianza en las relaciones de colaboración (Vitasek, 2016). Por lo tanto, en la Tabla 3-5 se ha intentado identificar si una de las partes en la coordinación ostenta más poder y si el comportamiento es oportunista o de equipo en esta relación. En pocos de los trabajos seleccionados, se hace referencia explícita al poder en esas relaciones y si hay desequilibrios en el mismo o si se ejerce. Por lo tanto, en

algunos de los trabajos se ha dejado en blanco las características del tipo de relación. En otros, se ha podido interpretar en función del tipo de mecanismo propuesto o la capacidad de resolver discrepancias. Aunque en general el comportamiento de equipo o de confianza es asumido en muchos de los trabajos científicos, según comentan Chen et al. (2004). En las subastas (Dash et al., 2007), como herramienta de coordinación, no es necesario asumir la necesidad de un comportamiento de equipo, ya que el comportamiento oportunista se corrige implícitamente.

Por otro lado, pocos de estos trabajos presentan las consecuencias de un posible comportamiento oportunista, aunque en varios de ellos se sugiere como línea de investigación futura (Buer et al., 2013; Dash et al., 2007; Dudek et al., 2007; Lehoux et al., 2014; Pittman et al., 2007). El comportamiento oportunista puede ser propio de una relación o puede aparecer por el aprendizaje que realizan las partes en las negociaciones sucesivas en el tiempo, dado que la información compartida puede permitir llegar a estimar informaciones privadas, no compartidas, como ocurre en situaciones de planificación de las operaciones con el procedimiento de horizontes rodantes. Existen pocos estudios que analicen o mencionen el aprendizaje de la negociación (Albrecht et al., 2015; Dash et al., 2007). Los incentivos adecuados para proporcionar información verdadera sobre la negociación y los factores que influyen para evitar comportamientos oportunista son áreas para futuras líneas de investigaciones (Wang et al., 2016). Estas diferentes líneas de investigación deberían considerarse al definir posteriores preguntas al presente trabajo de definir un algoritmo de coordinación para la planificación de operaciones basada en el concepto *stroke* de esta tesis.

Dentro de este apartado de relación entre los miembros de la CdS, se identifican los trabajos de posibles renegociaciones debido a cambios en la planificación de operaciones por el procedimiento de horizontes rodantes. En cada nuevo tramo en el que se planifica, se pueden generar adelantos, modificaciones o cancelaciones de las operaciones previamente planificadas entre los miembros de la CdS. Las consecuencias de estos cambios deben ser contempladas en los mecanismos de coordinación. Los efectos tales como el nerviosismo en la CdS o los incrementos de costes deben evaluarse dentro de las posibles compensaciones para mitigarlos (Stadtler, 2007). El procedimiento de horizontes rodantes son una realidad habitual en la industria para lidiar con la incertidumbre (Stadtler, 2007), donde el plan existente se actualiza y se extiende, lo que implica la necesidad de una renegociación entre los miembros de la CdS y debería contemplarse en los mecanismo de coordinación. Sin embargo, las consecuencias de dichos cambios no se consideran en la mayoría de los modelos (Stadtler, 2007). En esta selección de artículos, solo 4 estudios utilizaron el procedimiento de horizontes rodantes (Frazzon et al., 2010; Lehoux et al., 2010a, 2010b, 2014) como una forma de abordar la realidad de la industria. Pero ninguno de estos trabajos propone una renegociación que compense los posibles prejuicios generados por los cambios en la planificación.

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

Tabla 3-5: Relaciones entre los miembros de la CdS de los trabajos revisados.

Referencia	Poder	Comportamiento	Análisis del oportunismo	Aprendizaje	Horizontes rodantes
(Agnētis et al., 2006)	-	T			
(Attanasio et al., 2006)	-	T			
(Dash et al., 2007)	-	Oppor	x	x	
(Dudek et al., 2007)	S	T	x		
(Pibernik et al., 2007)	-	T	x		
(Pittman et al., 2007)	-	T			
(Cheng et al., 2008)	-	T			
(Feng et al., 2008)	-	T			
(Jung et al., 2008)	B	T			
(Kelly et al., 2008)	-	T			
(Nie et al., 2008)	-	T			
(Nishi et al., 2008)	S	T			
(Walther et al., 2008)	B	T			
(Jeong et al., 2009)	-	T			
(Pukkala et al., 2009)	-	T			
(Silva et al., 2009)	B	T			
(Frazzon et al., 2010)	B	T			x
(Gaudreault et al., 2010)	-	T			
(Gunnerud et al., 2010)	-	T			
(Homberger, 2010)	-	T			
(Homberger et al., 2010)	-	T			
(Lee et al., 2010)	S	T			
(Lehoux et al., 2010a)	B	T			x
(Lehoux et al., 2010b)	B	T			x
(Homberger et al., 2011)	-	T			
(Homberger, 2011)	-	T			
(Lau et al., 2011)	-	T			
(Mouret et al., 2011)	-	T			
(Singh et al., 2011)	S	T			
(Lu et al., 2012)	-	T			
(Buer et al., 2013)	-	T	x		
(Kovács et al., 2013)	B	T			
(Taghipour et al., 2013)	B	T			
(Thomas et al., 2013)	S	T			
(Ziebuhr et al., 2013)	-	T			
(Behnamian, 2014)	-	T			
(Kong et al., 2014)	S	T			
(Lehoux et al., 2014)	B	T	x		x
(Reiss et al., 2014)	-	T			
(Sokoler et al., 2014)	-	T			
(Thomas et al., 2014)	S	T			
(Acar et al., 2015)	B	T			
(Albrecht et al., 2015)	B	T		x	
(Buer et al., 2015)	B	T			
(Eslíkizi et al., 2015)	B	T			

(Harb et al., 2015)	B	T
(Hombberger et al., 2015)	-	T
(Mason et al., 2015)	B	T
(Qu et al., 2015)	B	T
(Thomas et al., 2015)	S	T
(Ziebuhr et al., 2015)	B	T
(Agnētis et al., 2016)	B	T
(Bajgiran et al., 2016)	B	T
(Jia et al., 2016)	B	T
(Singh et al., 2016)	B	T
(Tang et al., 2016b)	-	T
(Wenzel et al., 2016a)	S	T
(Wenzel et al., 2016b)	S	T
(Zoghiami et al., 2016)	B	T

B Comprador, S Proveedor, T Equipo, *Oppor* oportunista. Fuente: Elaboración propia.

3.3.4 Objetivos de la coordinación

Los objetivos de la coordinación entre los miembros de la CdS identificados de los artículos seleccionados que se pueden apreciar en la Tabla 3-6, se agrupan en:

- De alineación
- Búsqueda del óptimo
- Solución justa

En este apartado se analizan las pretensiones de los mecanismos de coordinación (ver Tabla 3-6). Los objetivos perseguidos por la coordinación pueden ser de desear satisfacer los requerimientos de la demanda, o buscar una solución óptima a la CdS o avanzar en una solución justa de reparto de los beneficios generados por la coordinación. Alinear los requerimientos es buscar que los proveedores puedan satisfacer los requerimientos de sus clientes. Buscar una solución óptima a la CdS hace referencia a acercarse al máximo beneficio o mínimo coste del acumulado de todos los miembros que conformen la CdS, que se obtendría en un cálculo centralizado con toda la información de todas las entidades de la CdS (Pibernik et al., 2007). Por último, el reparto de los beneficios generados de forma justa hace referencia al reparto de los beneficios o costes en función del riesgo que asume cada eslabón de la CdS en la cooperación. Dicho riesgo puede referirse a los costes de oportunidad de la cooperación o a los costes que asume cada miembro para realizar esta coordinación.

Los mecanismos de coordinación pueden ayudar a lograr estos objetivos o simplemente mejorarlos con respecto a una situación de descoordinación. Los mecanismos de coordinación jerárquicos, sin compensaciones o con renegociaciones, tanto aguas arriba como aguas abajo, logran una mejor alineación de los flujos de material en la CdS y reducen los costes totales con respecto a una situación sin coordinación (Agnētis et al., 2016). En la Tabla 3-6 se identifican como "*alignment*" esos mecanismos. Otros mecanismos de coordinación buscan acercarse al objetivo de una solución óptima de la CdS, aunque los resultados de alguno de sus participantes pueden ser peores que los obtenidos de una situación sin coordinación. Por lo tanto, para

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

asegurar el interés de todos los participantes en la coordinación, se tienen que realizar compensaciones o descuentos que compensen estas pérdidas locales (Eslíkizi et al., 2015). En la Tabla 3-6, se identifican como "*near opt.*". Se puede observar que el 49% de los artículos incluidos tratan de encontrar una solución óptima, incluso cuando el comportamiento de equipo no es necesariamente común en la industria, y es requerido en casi todos los mecanismos. En otros casos, se persigue una solución justa que no busca necesariamente el óptimo global (Lehoux et al., 2010a), en estos casos se identifican como "*fair*" en la Tabla 3-6. Diferentes definiciones del término justo se puede encontrar en Stadler (2007) o Katok & Pavlov (2013) pero se alejan del trabajo de la tesis.

Tabla 3-6: Solución requerida, resultados y sector de los trabajos revisados.

Referencia	Tipo de objetivo	Sector
(Agnétis et al., 2006)	Alignment	-
(Attanasio et al., 2006)	Near opt.	Computational grid
(Dash et al., 2007)	Near opt.	-
(Dudek et al., 2007)	Fair	-
(Pibernik et al., 2007)	Fair	-
(Pittman et al., 2007)	Near opt.	Wood industry
(Cheng et al., 2008)	Near opt.	Chemical industry
(Feng et al., 2008)	Alignment	Wood industry
(Jung et al., 2008)	Alignment	3PL
(Kelly et al., 2008)	Alignment	Chemical industry
(Nie et al., 2008)	Near opt.	-
(Nishi et al., 2008)	Near opt.	Chemical industry
(Walther et al., 2008)	Near opt.	Recycling industry
(Jeong et al., 2009)	Near opt.	-
(Pukkala et al., 2009)	Near opt.	Wood industry
(Silva et al., 2009)	Alignment	-
(Frazzon et al., 2010)	Alignment	3PL
(Gaudreault et al., 2010)	Alignment	Wood industry
(Gunnerud et al., 2010)	Near opt.	Chemical industry
(Hombberger, 2010)	Fair	*
(Hombberger et al., 2010)	Fair	*
(Lee et al., 2010)	Near opt.	-
(Lehoux et al., 2010a)	Fair	Wood industry
(Lehoux et al., 2010b)	Fair	Wood industry
(Hombberger et al., 2011)	Fair	*
(Hombberger, 2011)	Fair	*
(Lau et al., 2011)	Near opt.	Container Terminal Operations
(Mouret et al., 2011)	Near opt.	Chemical industry
(Singh et al., 2011)	Near opt.	Mining industry
(Lu et al., 2012)	Near opt.	-
(Buer et al., 2013)	Fair	*
(Kovács et al., 2013)	Fair	-
(Taghipour et al., 2013)	Fair	-
(Thomas et al., 2013)	Near opt.	Mining industry
(Ziebuhr et al., 2013)	Fair	*

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

(Behnamian, 2014)	Near opt.	-
(Kong et al., 2014)	Near opt.	Wood industry
(Lehoux et al., 2014)	Fair	Wood industry
(Reiss et al., 2014)	Alignment	*
(Sokoler et al., 2014)	Near opt.	Energy industry
(Thomas et al., 2014)	Near opt.	Mining industry
(Acar et al., 2015)	Alignment	Chemical industry
(Albrecht et al., 2015)	Near opt.	-
(Buer et al., 2015)	Fair	*
(Eslikizi et al., 2015)	Fair	*
(Harb et al., 2015)	Near opt.	Heating industry
(Homberger et al., 2015)	Fair	*
(Mason et al., 2015)	Near opt.	Farm industry
(Qu et al., 2015)	Near opt.	-
(Thomas et al., 2015)	Near opt.	Mining industry
(Ziebuhr et al., 2015)	Fair	*
(Agnētis et al., 2016)	Fair	3PL
(Bajgiran et al., 2016)	Near opt.	Wood industry
(Jia et al., 2016)	Fair	3PL
(Singh et al., 2016)	Near opt.	-
(Tang et al., 2016b)	Fair	-
(Wenzel et al., 2016a)	Near opt.	Chemical industry
(Wenzel et al., 2016b)	Near opt.	Chemical industry
(Zoghiami et al., 2016)	Fair	-

near opt. cerca del óptimo, - no definido, * estructura de producto es conocida por todas las entidades (i.e. automóvil). Fuente: Elaboración propia.

3.4 Mecanismos de coordinación desde el marco de referencia interno

El análisis de los trabajos seleccionados se presenta a continuación al aplicar los apartados del marco de referencia interno. Los apartados del marco referencia agrupados como internos incluyen los elementos propios de los mecanismos de coordinación utilizados. En dichos apartados, se identifican los modelados utilizados, las características de los mecanismos de coordinación aplicados y la calidad de los mismos.

3.4.1 Modelos y pasos en la colaboración

Los modelos y pasos en la colaboración entre los miembros de la CdS identificados de los artículos seleccionados que se puede apreciar en la Tabla 3-7, se agrupan en:

- Modelo de decisión (lineal, entero, mixto, cuadrático...)
- Fase de colaboración (diseño, planificación, ejecución, evaluación)
- Información oculta (costes, capacidades...)
- Información compartida (costes, capacidades...)
- Objetivo global (beneficios, coste, servicio...)
- Objetivos locales (beneficios, coste, nivel de servicio...)

- Modelado estructura de producto (gozinto, strokes...)

En este apartado se trata de analizar el modelado utilizado por los diferentes trabajos (ver Tabla 3-7). Se identifica la forma utilizada para representar la estructura de las operaciones en los modelos. De los trabajos seleccionados no todos incluyen una estructura del producto en sus modelos. En los casos de coordinación de unidades independientes que comparten un recurso común no es necesario incluir en el modelo la estructura de los productos o servicios. En los casos de programación de tareas se pueden definir dependencias y estructuras de operaciones, pero no se han encontrado en los trabajos seleccionados. De la Tabla 3-7 se observa que en 29 de los casos se utiliza la representación Gozinto, pero sin estructuras de operaciones con alternativas, co-productos o embalajes comunes.

La mayoría de los trabajos analizados utiliza un enfoque de modelado de programación lineal con elementos binarios o enteros (Programación lineal de enteros mixtos MILP), excepto 4 que utilizan programación lineal (LP). Por otro lado, hay 4 que aplican programación cuadrática (QP). Finalmente, la modelización *quasi-linear* se puede observar en el trabajo de Dash et al. (2007) para poder aplicar los mecanismos de Vickrey-Clarke-Groves (VCG).

La fase en la que surge la coordinación es en la mayoría de los casos en la fase de planificación, cuando se asignan cargas o lotes a las entidades. Solo en 4, están en la fase de diseño, al determinar interlocutores y capacidad. El resto, 14, están en la fase de ejecución, cuando se establece la secuencia, dado que las cargas ya fueron asignadas. Por otro lado, no se han encontrado trabajos que realicen la coordinación en la fase de evaluación. En la revisión realizada en su momento por Stadtler (2007) tampoco encontró trabajos en esta fase. La fase de evaluación hace referencia en este trabajo, a las situaciones cuando se revisan y evalúan las operaciones ya realizadas y sirven para futuras negociaciones, tal y como lo realiza Stadtler (2007).

Con respecto a qué información está oculta y cuál es compartida, es necesario remarcar que se ocultan los costes locales en todos los trabajos seleccionados. Cada entidad hace sus propios cálculos localmente y comparte solo los precios por los recursos compartidos, por el uso de dicho recurso o por la aceptación de diferentes propuestas de planificación. Por otro lado, es importante reseñar el uso de un protocolo de seguridad para compartir la información. Dicho protocolo permite compartir la información de todos los miembros de la CdS pero sin difundir de que miembro de la CdS es el dato compartido (Singh et al., 2016). La información compartida está directamente relacionada con el mecanismo de coordinación utilizado.

Los objetivos locales perseguidos por las entidades no siempre coinciden con el objetivo global. En ciertos casos tanto los objetivos locales como los globales buscan minimizar los costes, pero los costes incluidos difieren entre ambos. Behnamian (2014) combina los objetivos de cada entidad de minimizar costes, en este caso distintas factorías, con el objetivo conjunto de mejorar las fechas de entrega en el modelado logístico que relaciona con su mecanismo de coordinación.

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

Tabla 3-7: Modelos y pasos en la colaboración de los trabajos revisados.

Referencia	Modelo de decisión	Fase de colaboración	Información oculta	Información compartida	Objetivo Global	Objetivo local	Estructura
(Agnētis et al., 2006)	MILP	Execution	Local costs	Schedule, buffer, capacity, storage cost	MC	MC	-
(Attanasio et al., 2006)	MILP	Execution	Local capacity	Resource dual value	MC _{max}	MC _{max}	-
(Dash et al., 2007)	auction / Quasi-linear	Planning	Local costs	Quantity, price	MRA	MP	-
(Dudek et al., 2007)	MILP	Planning	Local costs	Differential cost form their optimal value	MC	MC	Gozinto
(Pibernik et al., 2007)	MILP	Planning	Local costs	Demand	MC	MC	Gozinto
(Pittman et al., 2007)	MILP	Planning	Local harvest restriction	Internal price	MNPV	MNPV	-
(Cheng et al., 2008)	LP	Execution	Local chemical parameters	Internal price for shared steam	MC	MC	-
(Feng et al., 2008)	MILP	Planning	Local cost	Sales, lot size	MP	MC	Gozinto
(Jung et al., 2008)	LP	Execution	Local costs	Preferred plan	MC	MC	Gozinto
(Kelly et al., 2008)	MILP	Execution	Local restriction	Resource, regulation, register, offers and obstacles-offsets-outages	MC	MC	-
(Nie et al., 2008)	MILP	Planning	Local costs	Internal price	MC	MC	Gozinto
(Nishi et al., 2008)	MILP	Planning	Local costs	Internal price	MC	MC	-
(Walther et al., 2008)	MILP	Planning	Local costs	Internal price	MP	MP	Gozinto
(Jeong et al., 2009)	MILP	Execution	Processing time and routings on	Machine use	MTC _i	MTC _i	-
(Pukkala et al., 2009)	MILP	Planning	Local grow conditions	Internal price	MFG	MFG	-
(Silva et al., 2009)	MILP	Execution	Local costs	Pheromone matrix	MC	MC	-
(Frazzon et al., 2010)	MILP	Execution	Local cost	Provision date of orders, demand	MC	MC	-
(Gaudreault et al., 2010)	MILP	Planning	Local costs	Demand	MC	MC	Gozinto
(Gunnerud et al., 2010)	MILP	Execution	Local costs	Internal price	MC	MC	-
(Homberger, 2010)	MILP	Planning	Local costs	Proposed contracts and agents votes	MV	MC	Gozinto
(Homberger et al., 2010)	MILP	Planning	Local costs	Proposed contracts and agents votes	MV	MC	Gozinto
(Lee et al., 2010)	MILP	Planning	Local costs	Order periods, demand, warehouse cost/orders periods	MC	MC	-
(Lehoux et al., 2010a)	MILP	Planning	Local costs	Orders	MP	MP	Gozinto
(Lehoux et al., 2010b)	MILP	Planning	Local costs	Orders/inventory cost	MP	MP	Gozinto
(Homberger et al., 2010)	MILP	Planning	Local costs	Proposed contracts and	MV	MC	Gozinto

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

2011)				agents votes				
(Homberger, 2011)	MILP	Planning	Local costs	Proposed contracts and agents votes	MV	MC	Gozinto	
(Lau et al., 2011)	MILP	Execution	Local capacity	Internal price	MCman	MCman	-	
(Mouret et al., 2011)	MILP	Execution	Local costs	Internal price	MP	MP	-	
(Singh et al., 2011)	MILP	Execution	Local requirements	Internal price	MTWT	MTWT	-	
(Lu et al., 2012)	LP	Planning	Local costs	Use of common resources and internal prices	MP	MP	-	
(Buer et al., 2013)	MILP	Planning	Local costs	Proposed contracts and agents votes	MV	MC	Gozinto	
(Kovács et al., 2013)	MILP	Planning	Local costs	Proposal contract interest and financial incentives,	MP	MP	-	
(Taghipour et al., 2013)	MILP	Planning	Local costs	Proposal contract interest and financial incentives,	MP	MP	Gozinto	
(Thomas et al., 2013)	MILP	Planning	Local costs	Internal price	MC	MC		
(Ziebuhr et al., 2013)	MILP	Planning	Local costs	Proposed contracts and agents votes	MV	MC	Gozinto	
(Behnamian, 2014)	MILP	Planning	Local capacity	Feasibility	MC	Due date	-	
(Kong et al., 2014)	MILP	Planning	Local costs	Internal price	MP	MP	Gozinto	
(Lehoux et al., 2014)	MILP	Planning	Local costs	Demand	MP	MP	Gozinto	
(Reiss et al., 2014)	MILP	Planning	Local costs	Proposed contracts and agents variation of the local production cost	MC	MC	Gozinto	
(Sokoler et al., 2014)	LP - QP	Planning	Local costs	Internal price	MC	MC	-	
(Thomas et al., 2014)	MILP	Planning	Local costs	Internal price	MC	MTWT	-	
(Acar et al., 2015)	MILP	Planning	Local plan	Demand, cost, capacity	MC	MC	Gozinto	
(Albrecht et al., 2015)	LP	Planning	Local costs	Assignments and cost differential	MP	MP	Gozinto	
(Buer et al., 2015)	MILP	Design/Planning	Local set up and inventory holding	Proposed contracts, agents votes, total local cost and savings	MV	MC	Gozinto	
(Eslíkizi et al., 2015)	MILP	Design/Planning	Local set up and inventory holding	Proposed contracts, agents votes, total local cost and savings	MV	MC	Gozinto	
(Harb et al., 2015)	MILP	Planning	Local costs	Internal price	MC	MC	-	
(Homberger et al., 2015)	MILP	Planning	Local costs	Proposed contracts, agent voting and agents variation of the local production cost	MV	MC	Gozinto	
(Mason et al., 2015)	MILP	Planning	Local costs	Internal price	MP	MP	Gozinto	
(Qu et al., 2015)	QP	Design/Planning	Local costs	Internal price	MP	MP	-	
(Thomas et al., 2015)	MILP	Planning	Local costs	Internal price and	MC	MC	-	

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

2015)					resource availability or production capacity				
(Ziebuhr et al., 2015)	MILP	Design/Planning	Local costs	Proposed agents votes	contracts,	MV	MC	Gozinto	
(Agnētis et al., 2016)	MILP	Execution	Local cost, capacities	Due dates, proposed	planning	MCman	MC	-	
(Bajgiran et al., 2016)	MILP	Planning	Local costs	Internal price		MP	MC	Gozinto	
(Jia et al., 2016)	MILP	Planning	Local cost, capacities	Planning proposed and compensation		MP	MP	Gozinto	
(Singh et al., 2016)	MILP	Planning	Local costs	Internal price		MC	MC	-	
(Tang et al., 2016b)	MILP	Execution	Capacities	Internal price		MCman	MCman	-	
(Wenzel et al., 2016a)	QP	Planning	Local costs	Internal price		MC	MC	-	
(Wenzel et al., 2016b)	QP	Planning	Local costs	Internal price		MC	MC	-	
(Zoghalmi et al., 2016)	MILP	Planning	Local costs	Proposed interest and incentives	contract discount	MP	MP	Gozinto	

MILP Mixed Integer Linear Programming, *LP* Linear Programming, *QP* Quadratic Programming, *MC* Minimize cost, *MCman* Minimize makespan, *MRA* Maximize resource allocation, *MP* Maximize profit, *MTCI* Minimize total completion time, *MFG* Maximize forest grow, *MV* Maximize voting, *MNPV* Maximize net present value of income, *MTWT* Minimize total weighted tardiness, - No aplica. Fuente: Elaboración propia.

3.4.2 Características de la implantación del mecanismo

Los mecanismos de coordinación identificados de los artículos seleccionados que se pueden apreciar en la Tabla 3-8, se agrupan en:

- Mecanismo (subasta, jerárquico, descomposición matemática, metaheurísticos)
 - Subastas (AM)
 - Jerárquica (HBP)
 - Descomposición matemática (LR, DW, B)
 - Metaheurísticas (MH)
- Mediador (si, no)
- Solución inicial (aguas arriba, aguas abajo, mediador...)
- Nº de planes intercambiados (1,2,... pocos, muchos)
- Pagos compensatorios (si, no)
- Criterios de finalización de la negociación (iteraciones, gap...)

Subastas (Auction Mechanism, AM)

Hay trabajos que pretenden que los agentes pujen y ofrezcan la mejor combinación según sus intereses locales. Dash et al. (2007) utilizan una Subasta Doble Continua (CDA) como extensión de la subasta de Vickrey-Clarke-Groves (VCG), donde se alienta a los agentes a informar honestamente de su capacidad y costes. Otras subastas utilizan el enfoque de modelado de la programación matemática no lineal (Tang et al., 2016b). Otros trabajos presentan una subasta combinatoria del problema de la asignación de máquinas para ajustar el precio de asignación con el método del subgradiente (Lau et al., 2011). Attanasio et al. (2006) proponen alternativas al método del subgradiente, asimilando a las subastas, para acelerar la convergencia de los precios de asignación.

Jerárquica (Hierarchy Based Protocol, HBP)

En el mecanismo jerárquico de coordinación se comparte la previsión de necesidades entre los miembros. Este mecanismo de coordinación simple genera mejores resultados que la desinformación o la no coordinación. En la no coordinación, los proveedores deben hacer pronósticos de la demanda según datos históricos u otros medios. El mecanismo de coordinación jerárquico puede iniciarse mediante propuestas sin negociaciones posteriores aguas abajo (Acar et al., 2015), aguas arriba (Agnētis et al., 2006; Frazzon et al., 2010), con contrapropuestas (Gaudreault et al., 2010), con negociaciones (Kelly et al., 2008) y con compensaciones (Taghipour et al., 2013). En los mecanismos jerárquicos no se tienen en cuenta los efectos de las decisiones sobre todos los socios localmente, por lo que pueden producir planes inferiores al óptimo en comparación con la coordinación centralizada (Bhatnagar et al., 1993). Dudek & Stadler (2005) compararon la planificación en sentido aguas arriba con la planificación centralizada, observando un promedio de diferencias del 14,1% en los costes totales de la CdS. No se han identificado otros trabajos que comparen el resto de situaciones.

Finalmente, se han incluido otros métodos de coordinación jerárquicos, como las propuestas CFPR® (planificación colaborativa, previsión y reabastecimiento) (VICS, 2004), asimilándolos a una previsión de demanda compartida, o VMI (Inventario gestionado por el vendedor), o reposición regular (Lehoux et al., 2010b).

Descomposición matemática (Lagrangian Relaxation, LR; Dantzig-Wolfe, DW; Benders, B)

De la revisión se puede destacar el uso de la descomposición matemática con el método del subgradiente (Fisher, 1985; Held et al., 1970, 1971) para actualizar el multiplicador de Lagrange en 7 de los artículos (Attanasio et al., 2006; Jeong et al., 2009; Kong et al., 2014; Lau et al., 2011; Lu et al., 2012; Pukkala et al., 2009; Walther et al., 2008).

Pero el método del subgradiente tiende a oscilar en sus resultados (Singh et al., 2011) y en su velocidad de convergencia (Nie et al., 2008) especialmente cuando el tamaño de salto es pequeño (Thomas et al., 2013). Por lo que ciertos autores proponen otros métodos para actualizar el multiplicador como con *Volume Algorithm* (Singh et al., 2011, 2016) y la combinación con otros algoritmos como *Wedelin Algorithm* (Thomas et al., 2015, 2013). Otras alternativas utilizadas son la combinación de algoritmos basados en planos de corte, subgradiente y *boxstep* aplicados por Mouret et al. (2011). Otra línea es la actualización del multiplicador de Lagrange por *Column Generation* (Sokoler et al., 2014) o la estabilización por elementos ponderados propuestos por Thomas et al. (2014).

El multiplicador también se puede actualizar utilizando el método *Augmented Lagrangian*, donde se utiliza una función cuadrática para actualizar el multiplicador. Esta función cuadrática puede transformarse, para mantener el modelado lineal (Nishi et al., 2008), o mantenerse dentro de un modelado no lineal (Qu et al., 2015) resolviendo una función cuadrática (Lee et al., 2010; Wenzel et al., 2016a, 2016b).

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

Otra herramienta utilizada es la descomposición de Lagrange por el método de Dantzig-Wolfe (1960) que se encuentra en 7 trabajos (Tabla 3-8). En estos trabajos, el mediador centralizado actualiza el precio interno asignado al uso del recurso compartido o precio sombra (Harb et al., 2015; Mason et al., 2015) buscando cumplir con las restricciones relajadas ajustando el precio. Este mediador deberá elevar los precios internos de los recursos compartidos cuando las entidades soliciten más recursos que los disponibles. Este método tiende a la solución óptima del sistema, como ocurre con la actualización de los multiplicadores de Lagrange con el método del subgradiente en modelos lineales (Polyak 1969).

Benders (1962) propone dualizar la función y luego relajar las restricciones para generar subproblemas o agentes separables, donde un problema centralizado debe agregar el valor óptimo de cada subproblema con restricciones y funciones que no se pueden descomponer. El método de Benders solicitará los precios propuestos por los agentes para reducir o aumentar la capacidad compartidas (Behnamian, 2014).

Metaheurísticas (MH)

Se observan como mecanismos de coordinación metaheurísticos, la colonia de hormigas (Silva et al., 2009) o el recocido simulado (Buer et al., 2015; Dudek et al., 2007; Eslíkizi et al., 2015; Ziebuhr et al., 2013, 2015) o la búsqueda de vecindad variable (Reiss et al., 2014) que permiten buscar una mejor coordinación de acuerdo con sus reglas preestablecidas pero sin garantías de optimalidad. La búsqueda del multiplicador también aparece mediante combinaciones con metaheurísticas como los algoritmos genéticos (Nie et al., 2008) o los sistemas inmunológicos (Lu et al., 2012) o heurísticas específicas para el problema (Bajgiran et al., 2016). Bajgiran et al. (2016) aplican un algoritmo heurístico específico del problema, con nuevas restricciones, con el fin de mejorar las soluciones encontradas con la relajación de Lagrange.

En otros casos con modelados con soluciones finitas, se votan o ponderan las distintas soluciones y se identifica una mejor solución aplicando una metaheurística de búsqueda por vecindad (Homberger et al., 2015). Estos votos han sido evaluados por la regla *Borda Maximin Voting Rule* junto con la metaheurística de colmenas (Homberger et al., 2011, 2010) o con algoritmos evolutivos (Homberger, 2011). También han sido aplicadas otras reglas de votación y metaheurística como *Metropolis acceptance criterion* y la metaheurística de recocido simulado (Homberger, 2010) o con la regla de votación Rawls o Min-Max y la metaheurística de las feromonas de las hormigas (Buer et al., 2013).

Otros elementos del marco de referencia

Otro elemento en los mecanismos de coordinación son las compensaciones, donde se realizan pagos compensatorios de las pérdidas locales para permitir una mejor solución global. Se han identificado 12 trabajos con pagos compensatorios, que se pueden ver en la Tabla 3-8. Los pagos compensatorios permiten compensar los óptimos locales entre los agentes y alcanzar mejores soluciones globales cercanas a la solución óptima centralizada.

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

El concepto de mediador se refiere a una figura independiente de la CdS que tiene acceso a la información y gestiona la búsqueda de la solución global. Por lo tanto, el mediador es una entidad de confianza que no tiene sesgo en la mediación. Esta figura se utiliza en la literatura científica, aunque se considera poco realista en una red de suministro (Hellingrath et al., 2011). Es posible que los agentes no deseen compartir valores específicos, como los costes, con un tercero (Lang et al., 2014). Por lo tanto, la figura del mediador se ha evitado en varios de los trabajos al proponer un mecanismo de coordinación sin la necesidad de dicho mediador. De los trabajos identificados sin la figura del mediador hay tres que intentan alcanzar resultados cercanos a los óptimos globales (Albrecht et al., 2015; Lee et al., 2010; Lu et al., 2012), aunque carecen de casos reales aplicados. Los otros casos sin mediador son procesos jerárquicos, donde solo intervienen los agentes de la CdS y ninguno de ellos tiene acceso a toda la información. En algunos de los trabajos jerárquicos, se realizan compensaciones con el fin de llegar a mejores soluciones globales de la CdS (Jia et al., 2016; Kovács et al., 2013; Lehoux et al., 2010a, 2014; Pibernik et al., 2007; Silva et al., 2009; Taghipour et al., 2013; Zoghliami et al., 2016).

La estimación del número de planes intercambiados necesarios para llegar a la propuesta del plan conjunto coordinado es definida como un indicador de los requerimientos computacionales del mecanismo de coordinación propuesto. Este se puede observar en la Tabla 3-8. Los mecanismos con menos de 30 propuestas intercambiadas son identificados como “*pocos*”, siendo estos el 24% de los trabajos. El 59% de los trabajos son identificados como “*muchos*”, al definirse en los mecanismos de coordinación la necesidad de más iteraciones, superiores a 30. Estos mecanismos requieren de más consumo computacional para poder llegar al plan de conjunto coordinado. En los mecanismos de coordinación jerárquicos aparecen casos sin negociación, donde solo se intercambia una propuesta o con una posible segunda propuesta, por lo tanto, con dos o menos iteraciones.

También se han registrado los criterios de finalización de las negociaciones en los distintos trabajos. Estos criterios van desde el número de iteraciones previstas, tolerancia en las soluciones admisibles, tiempo computacional o según los parámetros propios de la metaheurística.

Tabla 3-8: Mecanismo de coordinación de los trabajos revisados.

Referencia	Mecanismos	Mediador	Solución Inicial	Nº de planes intercambiados	Pagos compensatorios	Criterios de finalización de la negociación
(Agnētis et al., 2006)	HBP Hierarchical, no negotiation		D	1		-
(Attanasio et al., 2006)	AM Auction, Lagrangian-based decomposition	x	D	Muchos		IN or MG
(Dash et al., 2007)	AM Continuous Double Auction		D	Muchos		DA
(Dudek et al., 2007)	MH Shared cost increase and Simulated Annealing		U	Pocos	x	SA
(Pibernik et al., 2007)	HBP Partially centralized with a		U	1	x	-

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

al., 2007)			hierarchical without negotiation					
(Pittman et al., 2007)	DW		Dantzig–Wolfe decomposition	x	L	Muchos		IN or MG
(Cheng et al., 2008)	DW		Dantzig–Wolfe decomposition	x	L	Muchos		IN or MG
(Feng et al., 2008)	HBP		Hierarchical, no negotiation		D	1		-
(Jung et al., 2008)	HBP		Hierarchical, negotiation		D	Pocos		DA
(Kelly et al., 2008)	HBP		Hierarchical, weight adjustment		D	Pocos		CT
(Nie et al., 2008)	LR		Lagrangian relaxation and multiplier update with Genetic Algorithms	x	D	Muchos		IN or MG
(Nishi et al., 2008)	LR		Augmented Lagrangian linearized	x	L	Muchos		IN or MG
(Walther et al., 2008)	LR		Lagrangian relaxation and multiplier update with a linear function	x	U	Muchos		IN or MG
(Jeong et al., 2009)	LR		Lagrangian relaxation and multiplier update with modified subgradient	x	L	Muchos		IN or MG
(Pukkala et al., 2009)	LR		Lagrangian relaxation, subgradient	x	L	Muchos		IN
(Silva et al., 2009)	MH		Pheromone matrix		D	Pocos		IN
(Frazzon et al., 2010)	HBP		Hierarchical, no negotiation		U	1		-
(Gaudreault et al., 2010)	HBP		Hierarchical, negotiation		B	2		-
(Gunnerud et al., 2010)	DW/LR		DW, Lagrangian decomposition	x	L	Pocos		MG
(Hombberger, 2010)	MH		Metropolis acceptance criterion and Simulated annealing method	x	R	Muchos		SA
(Hombberger et al., 2010)	MH		Borda Maximin voting rule and Pheromone matrix	x	R	Muchos		IN
(Lee et al., 2010)	LR		Augmented Lagrangian with Alternating Direction Method and Diagonal Quadratic Approximation Method	x	L	Muchos		IN
(Lehoux et al., 2010a)	HBP		Hierarchical, no negotiation		D	1	x	-
(Lehoux et al., 2010b)	HBP		Vendor Managed Inventory		D	1		-
(Hombberger et al., 2011)	MH		Borda Maximin voting rule and Pheromone matrix	x	R	Muchos		IN
(Hombberger, 2011)	MH		Borda Maximin voting rule and Evolutionary Algorithms	x	R	Muchos		IN
(Lau et al., 2011)	AM		Combinatorial auction – Lagrangian relaxation	x	U	Pocos		IN
(Mouret et al., 2011)	LR		Lagrangian decomposition, multiplier is updated with cutting planes, subgradient, and boxstep	x	D	Pocos		IN or MG

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

(Singh et al., 2011)	LR	Lagrangian relaxation, multiplier is updated with Volume Algorithm	x	D	Muchos		IN or MG
(Lu et al., 2012)	LR	Lagrangian relaxation and immunity-inspired coordination (LR-ICI)		L	Muchos		IN or MG
(Buer et al., 2013)	MH	Modification of Borda Maximin voting rule and Pheromone matrix	x	R	Muchos		IN
(Kovács et al., 2013)	HBP	Hierarchical, shared benefits		D	Pocos	x	2º
(Taghipour et al., 2013)	HBP	Hierarchical, shared discount		D	Pocos	x	2º
(Thomas et al., 2013)	LR	Lagrangian relaxation, with Volume and Wedelin Algorithms.	x	U	Muchos		CT or MG
(Ziebuhr et al., 2013)	MH	Metropolis acceptance criterion and Simulated annealing method extended by a part-way reset procedure	x	R	Muchos		SA
(Behnamian, 2014)	B	Benders decomposition	x	D	Muchos		CT or feasible
(Kong et al., 2014)	LR	Lagrangian decomposition, subgradient	x	D	Muchos		CT or MG
(Lehoux et al., 2014)	HBP	Hierarchical, shared benefits		D	1	x	-
(Reiss et al., 2014)	MH	Increases of the local production cost and variable neighbourhood search	x	R	Muchos		CT
(Sokoler et al., 2014)	DW	Dantzig-Wolfe decomposition	x	L	Muchos		CT or MG
(Thomas et al., 2014)	DW	Column Generation, internal price stabilisation with multiple columns stored	x	U	Muchos		CT
(Acar et al., 2015)	HBP	Hierarchical, no negotiation		D	1		-
(Albrecht et al., 2015)	DW	Dantzig-Wolfe modification		D	Pocos	x	MG
(Buer et al., 2015)	MH	Metropolis acceptance criterion, Simulated annealing method extended by a part-way reset procedure and side-payments	x	R	Muchos	x	SA
(Eslíkizi et al., 2015)	MH	Metropolis acceptance criterion, Simulated annealing method extended by a part-way reset procedure and side-payments	x	R	Muchos	x	SA
(Harb et al., 2015)	DW	Dantzig-Wolfe decomposition	x	D	Muchos		CT or MG or IN
(Hombberger et al., 2015)	MH	Voting-based solution acceptance criteria, Neighbourhood search, and side-payments to avoid local solutions	x	R	Muchos	x	IN
(Mason et al., 2015)	DW	Dantzig-Wolfe decomposition	x	U	Pocos		IN or MG

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

(Qu et al., 2015)	LR	Augmented Lagrangian	x	U	Muchos		IN or MG
(Thomas et al., 2015)	LR	Lagrangian relaxation, Volume and Wedelin Algorithms. Secure-sum for lower bound update		U	Muchos		CTor MG or IN
(Ziebuhr et al., 2015)	MH	Simulated annealing extended by a part-way reset procedure	x	R	Muchos		SA
(Agnētis et al., 2016)	HBP	Hierarchical, no negotiation, fair schedule using the weighted Tchebycheff norm		U/ D	2		-
(Bajgiran et al., 2016)	LR	Lagrangian relaxation with subgradient and heuristics to ensure a feasible solution in the primal problem	x	U	Muchos		IN
(Jia et al., 2016)	HBP	Hierarchical, convergence of planning counter proposals with a penalty function on each iteration		U	Pocos	x	IN
(Singh et al., 2016)	LR	Lagrangian relaxation, subgradient, Secure-sum Protocol and a primal heuristic	x	U	Muchos		CTor MG
(Tang et al., 2016b)	AM	Auction	x	L	Muchos		IN
(Wenzel et al., 2016a)	LR	Lagrangian decomposition, subgradient, Recursive Quadratic Approximation	x	D	Pocos		CTor MG
(Wenzel et al., 2016b)	LR	Lagrangian decomposition, subgradient, Recursive Quadratic Approximation	x	D	Muchos		CTor MG
(Zoghiami et al., 2016)	HBP	Shared discount from supplier to an alternative planning		D	Pocos	x	IN

HBP jerárquico, *DW* como Dantzig-Wolf (1960), *LR* Lagrangian relajación, *B* descomposición según propuesta de Benders (1962), *MH* metaheurísticos, *AM* subastas, *D* aguas abajo, *U* aguas arriba, *L* local, *B* cuello de botella, *R* plan de mediador aleatorio, *pocos* definido ≤ 30 , *IN* número de iteraciones, *MG* gap mínimo, *DA* demanda asignada, *SA* recocido simulado, *CT* tiempo de computación. Fuente: Elaboración propia.

3.4.3 Novedades de las soluciones identificadas

La calidad y las novedades en la colaboración entre los miembros de la CdS identificados de los artículos seleccionados se puede encontrar en las Tabla 3-9, Tabla 3-10, Tabla 3-11, Tabla 3-12 y Tabla 3-13, se agrupan en:

- Evaluación de la calidad de la propuesta (demostración, simulación, banco de instancias)
- Aportación destacable

En este apartado, se recoge la forma en que los trabajos evalúan las soluciones y las novedades propuestas. Respecto de las soluciones propuestas se identifica si se aporta demostración de la convergencia, si se realiza la simulación de un caso de estudio, o se parte de un banco de instancias. Se puede observar en el Tabla 3-9 que en 3 casos se hace una demostración cómo de la convergencia del mecanismo propuesto. En 24 de los trabajos se realiza una simulación, a

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

partir de casos reales, de la aplicación de los mecanismos de coordinación propuestos. En el resto, se llevan a cabo una serie de pruebas computacionales para verificar la adecuación del mecanismo de coordinación utilizado. Estas pruebas, simulaciones y demostraciones permiten identificar las condiciones, situaciones, caso específico de empresa, entorno o sector en las que se extiende el análisis del comportamiento de los mecanismos de coordinación. Stadtler (2007) recomendó realizar pruebas computacionales para proporcionar mayores conocimientos sobre la calidad de las soluciones.

Tabla 3-9: Evaluación de la calidad de la propuesta

Referencia	Calidad de la propuesta
(Agnētis et al., 2006)	Demostración
(Attanasio et al., 2006)	Banco de instancias
(Dash et al., 2007)	Banco de instancias
(Dudek et al., 2007)	Banco de instancias
(Pibernik et al., 2007)	Banco de instancias
(Pittman et al., 2007)	Simulación
(Cheng et al., 2008)	Simulación
(Feng et al., 2008)	Simulación
(Jung et al., 2008)	Banco de instancias
(Kelly et al., 2008)	Simulación
(Nie et al., 2008)	Banco de instancias
(Nishi et al., 2008)	Simulación
(Walther et al., 2008)	Simulación
(Jeong et al., 2009)	Banco de instancias
(Pukkala et al., 2009)	Simulación
(Silva et al., 2009)	Simulación
(Frazzon et al., 2010)	Simulación
(Gaudreault et al., 2010)	Simulación
(Gunnerud et al., 2010)	Simulación
(Homberger, 2010)	Banco de instancias
(Homberger et al., 2010)	Banco de instancias
(Lee et al., 2010)	Banco de instancias
(Lehoux et al., 2010a)	Simulación
(Lehoux et al., 2010b)	Simulación
(Homberger et al., 2011)	Banco de instancias
(Homberger, 2011)	Banco de instancias
(Lau et al., 2011)	Simulación
(Mouret et al., 2011)	Simulación
(Singh et al., 2011)	Banco de instancias
(Lu et al., 2012)	Banco de instancias, demostración
(Buer et al., 2013)	Banco de instancias
(Kovács et al., 2013)	Banco de instancias
(Taghipour et al., 2013)	Banco de instancias
(Thomas et al., 2013)	Banco de instancias
(Ziebuhr et al., 2013)	Banco de instancias
(Behnamian, 2014)	Banco de instancias
(Kong et al., 2014)	Simulación

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

(Lehoux et al., 2014)	Simulación
(Reiss et al., 2014)	Banco de instancias
(Sokoler et al., 2014)	Simulación
(Thomas et al., 2014)	Banco de instancias
(Acar et al., 2015)	Simulación
(Albrecht et al., 2015)	Demostración
(Buer et al., 2015)	Banco de instancias
(Eslkizi et al., 2015)	Banco de instancias
(Harb et al., 2015)	Simulación
(Hombberger et al., 2015)	Banco de instancias
(Mason et al., 2015)	Simulación
(Qu et al., 2015)	Simulación
(Thomas et al., 2015)	Banco de instancias
(Ziebuhr et al., 2015)	Banco de instancias
(Agnētis et al., 2016)	Banco de instancias
(Bajgiran et al., 2016)	Simulación
(Jia et al., 2016)	Banco de instancias
(Singh et al., 2016)	Banco de instancias
(Tang et al., 2016b)	Banco de instancias
(Wenzel et al., 2016a)	Simulación
(Wenzel et al., 2016b)	Simulación
(Zoghiami et al., 2016)	Banco de instancias

Simulación test con datos de un caso real, *banco de instancias* test hecho con un banco de instancias, *demostración* la convergencia del mecanismo de coordinación es aportada. Fuente: Elaboración propia.

Respecto de las novedades aportadas por los trabajos analizados, estos se han agrupado en función del tipo de problema planteado. En la Tabla 3-10 están recogidos los trabajos referentes a la programación de la producción. En estos trabajos se presentan diferentes problemas de asignar las tareas a las distintas máquinas, en algunos casos con distintas ubicaciones. Pero en ninguno de ellos se presenta la estructura del producto.

Tabla 3-10: Aportaciones de los trabajos revisados en programación de la producción.

Referencia	Novedades
(Agnētis et al., 2006)	Presentan algoritmos de programación basados en las propuestas de los programas de los compradores, la capacidad del buffer y el coste del buffer. El coste total del sistema se reduce solo cuando se proporciona el coste del buffer intermedio.
(Attanasio et al., 2006)	Presentan resultados equivalentes a los obtenidos por un mecanismo de subasta basado en una heurística de Lagrange progresiva a los proporcionados por una heurística Max-Min centralizada.
(Jeong & Yim, 2009)	Minimizan el tiempo total de finalización en máquinas compartidas mientras mantienen la mayor autonomía posible de los subsistemas de producción. El multiplicador de Lagrange se actualiza con una modificación del método de subgradiente, solo con información local.
(Frazzon et al., 2010)	Analizan a partir de un caso de prueba práctico de programación de producción y transporte que la coordinación jerárquica sin negociación empeora hasta un máximo del 12% respecto de la solución calculada mediante un sistema centralizado.
(Lau et al., 2011)	Presentan un procedimiento adaptativo de ajuste de precios para la relajación Lagrangiana que muestra mejores propiedades de convergencia que el ajuste de precios con el método del subgradiente convencional.
(Singh & Ernst, 2011)	Presentan una combinación convexa de los subgradientes actuales y previos para incorporar en cada iteración la dirección del movimiento en la solución de la relajación de Lagrange.
(Thomas et al., 2013)	Proponen añadir una nueva restricción a cada subproblema, como versión de la restricción relajada, para asegurar que las soluciones encontradas por los individuos sean factibles con respecto a la restricción relajada.

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

(Behnamian, 2014)	Aplica la descomposición de Benders para una programación multifábrica.
(Thomas et al., 2014)	Muestran mediante experimentos computacionales que la Generación de Columnas supera a la Relajación Lagrangiana, pero los principales inconvenientes son su baja convergencia y la alta oscilación de los precios duales.
(Thomas et al., 2015)	Proponen diferentes algoritmos para evitar la figura del mediador y verificar el impacto del intercambio de información. Destacan que la información de la disponibilidad de recursos tiene un impacto mayor que la información de la capacidad de producción.
(Agnētis et al., 2016)	Presentan un calendario de equidad entre las propuestas de planificación aguas arriba y aguas abajo usando la norma ponderada de Tchebycheff, que coincide con la solución igualitaria, es decir, la solución que maximiza el pago mínimo entre las entidades.
(Singh & O'Keefe, 2016)	Proponen un método seguro en el método de subgradiente para intercambiar información entre las entidades con el fin de actualizar el paso con la información agregada de todos los usuarios. Una heurística es usada para asegurar una solución a la función principal a partir de las propuestas relajadas.
(Tang et al., 2016)	Expresan que cada célula de producción puede actuar como un subastador o un postor con ofertas de franjas horarias en las máquinas de otras células de trabajo para procesar sus propias piezas.

Fuente: Elaboración propia.

En otros trabajos, se ha buscado coordinar distintas unidades o entidades que tienen una restricción o un solo recurso compartido que las relaciona entre sí. Estos trabajos se centran en el recurso compartido sin analizar las operaciones de cada entidad. Sus novedades se pueden ver en la Tabla 3-11.

Tabla 3-11: Aportaciones de los trabajos revisados con restricción común.

Referencia	Novedades
(Pittman et al., 2007)	Utilizan la descomposición de Dantzig-Wolfe o la generación de columnas como mecanismo para coordinar la gestión local en la industria forestal, con casos simulados a partir de datos reales, redujeron los tiempos de computación en un problema centralizado.
(Cheng et al., 2008)	Presentan un mecanismo de coordinación por la descomposición de Dantzig-Wolfe de Autonomous Model Predictive Control en plantas químicas, logrando resultados equivalentes a un modelo centralizado.
(Kelly & Zyngier, 2008)	Proponen una nomenclatura estandarizada para describir la comunicación, coordinación y cooperación entre dos capas jerárquicas de un problema descompuesto.
(Pukkala et al., 2009)	Utilizan la relajación Lagrangiana con el método del subgradiente, con valores positivo y negativo, para una planificación forestal.
(Gunnerud & Foss, 2010)	Presentan a partir de un caso de estudio una comparativa entre la descomposición de Lagrange, una extensión de la descomposición de Dantzig-Wolfe que lineariza el problema (restricciones lineales y variables continuas) y el modelo centralizado. En los problemas más complejos, los dos métodos de descomposición consiguen soluciones con gaps inferiores al 0,5% en menos tiempo de cálculo que el modelo centralizado.
(Lee & Jeong, 2010)	Utilizan la relajación aumentada de Lagrange que se actualiza con dos procedimientos, uno que requiere un coordinador y otro que requiere una comunicación jerárquica entre los agentes.
(Mouret et al., 2011)	Exponen una combinación de planos de corte, el Boxstep y el subgradiente para la actualización del multiplicador de Lagrange que no requiere de la generación de actualizaciones heurísticas de los parámetros durante las iteraciones.
(Lu et al., 2012)	Presentan un algoritmo distribuido donde los subsistemas resuelven sus subproblemas a través de la optimización local, intercambian información parcial (dependiendo de los problemas específicos) con solo subsistemas vecinos y luego auto coordina sus subproblemas al computar los multiplicadores de Lagrange localmente con la información renovada recibida al comunicarse con sus vecinos, un proceso de toma de decisiones sincronizado, iterativo y distribuido inspirado en el sistema inmune humano.
(Kovács et al., 2013b)	Destacan que el proveedor puede abusar del mecanismo, generar deliberadamente un plan de referencia que sea inaceptable para el comprador y asignar costes de compensación masivos frente a cualquier otra alternativa.
(Sokoler et al., 2014)	Presentan un algoritmo de descomposición con el método de Dantzig-Wolfe, iniciado en caliente, para el <i>Model Predictive Control</i> de subsistemas desacoplados dinámicamente. Además, por simulación muestran

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

	que funciona más rápido que CPLEX®, Gurobi® y MOSEK® y es capaz de manejar problemas mucho más grandes que los solucionadores de propósito general.
(Harb et al., 2015)	Expresan que el modelo centralizado tiene mejores resultados, pero cuando aumenta el número de agentes, es más apropiado la gestión descentralizada, aunque mantiene un control centralizado (descomposición de Dantzig-Wolfe), dado que no se sobrecarga al aumentar con nuevos agentes.
(Qu et al., 2015)	Aplican un Augmented Lagrange a un proceso de selección de recursos y servicios dentro de clúster de una cadena de suministro, con el método de un bucle interno inexacto y un algoritmo de coordinación por bloques.
(Wenzel, Paulen, Krämer, et al., 2016)	Presentan una técnica de aproximación cuadrática para la actualización del precio interno que muestra una tasa de convergencia mejorada en comparación con el método basado en subgradiente. Comienzan con el método de subgradiente para recopilar puntos de solución a fin de crear una función cuadrática que permitirá actualizar el precio interno.
(Wenzel, Paulen, Stojanovski, et al., 2016)	Exponen inicialmente una actualización del precio interno por el método de subgradiente y posteriormente extrapolan a una regresión cuadrática de la restricción relajada, ya que son vértices de solución de la función dual; por lo tanto, su mínimo permite encontrar el nuevo precio interno.

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 3-12 se recogen los trabajos con modelos de planificación de las operaciones con situaciones de limitación de capacidad, multiproducto (excepto el trabajo de Dash et al. (2007) pero que no establecen la limitación de que todas las entidades conozcan las estructuras de todos los productos como en la Tabla 3-13. Ambas tablas recogen las novedades de los trabajos analizados que tratan la planificación de las operaciones.

Tabla 3-12: Aportaciones de los trabajos revisados con limitación de capacidad, multiproducto.

Referencia	Novedades
(Dash et al., 2007)	Realizan una asignación de la demanda continuamente sin la necesidad de un agente con la información centralizada, y cuando el número de participantes se incrementa la solución propuesta se acerca más al óptimo.
(Dudek & Stadtler, 2007)	Presentan un mecanismo de coordinación para un único proveedor y varias negociaciones de compradores con información reducida intercambiada. Los ahorros de los proveedores y la compensación de los compradores son recogidos en los términos contractuales. El mecanismo está cerca de la solución óptima, con un gap de 6,2% y busca una distribución justa.
(Pibernik & Sucky, 2007)	Presentan la planificación parcial centralizada y aguas arriba para mejorar un dominio de planificación aguas abajo. Generan solo un plan maestro localmente óptimo sin considerar las consecuencias para los dominios aguas arriba.
(Feng et al., 2008)	Comparan diferentes formas de realizar la coordinación jerárquica entre la centralización de ventas y operaciones mediante la descentralización de las compras y la distribución, centralizando las ventas con respecto a la capacidad disponible y descentralizando la producción, distribución y compras en cada centro, recomendando este último en un análisis de sensibilidad.
(Jung et al., 2008)	Proporcionan un marco descentralizado de planificación de la cadena de suministro para la asociación 3PL, centrándose en el lado operativo de la eficiencia de planificación de la cadena de suministro desde una perspectiva descentralizada.
(Nie et al., 2008)	Presentan una combinación del método de relajación Lagrangiana y los algoritmos genéticos para la planificación colaborativa, y los resultados de la simulación muestran una desviación promedio del óptimo central de 1,47%.
(Nishi et al., 2008)	Utilizan el Augmented Lagrangian como mecanismos de coordinación, reemplazando el término de la penalización cuadrática por un término de penalización lineal. El gap entre la solución descentralizada y una solución centralizada óptima se sitúa dentro del 3% en sus casos.
(Walther et al., 2008)	Actualizan el multiplicador de Lagrange mediante una función lineal inversamente proporcional a las iteraciones, solo con datos locales y diferentes condiciones. Los precios internos obtenidos de la simulación se aproximan a los precios reales para coordinar las actividades.
(Silva et al., 2009)	Proponen como herramienta de coordinación extender las matrices de feromonas, utilizadas por cada miembro para encontrar su mejor solución local mediante la heurística de colonias, para coordinar los distintos miembros de la CdS.
(Gaudreault et al., 2010)	Proponen una variación de la coordinación jerárquica al transmitir directamente la demanda externa del cliente al cuello de botella de la CdS, en lugar de pasar por la entidad aguas abajo o aguas arriba para proponer la planificación inicial.

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

(Lehoux, D'Amours, Frein, et al., 2010)	Presentan una coordinación aguas abajo jerárquica mejorada con el reparto del ahorro en transporte, lo que permite acercar los resultados a una coordinación central como la propuesta CPFR.
(Lehoux, D'Amours, & Langevin, 2010)	Analizan un beneficio compartido para alentar a los socios a unirse a un CPFR. Dado que, con el modo de inventario gestionado por el proveedor, el productor es responsable del inventario de su cliente y debe mantener existencias suficientes en el sitio del minorista para garantizar un alto nivel de servicio. Este modo permite mejorar el coste del transporte al proveedor. El CPFR genera la mayor ganancia para el productor, mientras que el modo de reposición regular es la estrategia más rentable para el minorista.
(Taghipour & Frayret, 2013)	Presentan una negociación mejorada del plan aguas arriba con un plan de descuento mediante un análisis computacional.
(Kong & Rönnqvist, 2014)	Presentan como herramienta de coordinación para la industria forestal, establecer los precios internos por el método del subgradiente, para darle al administrador la comprensión de los valores de los registros en las diferentes áreas y tiempos.
(Lehoux et al., 2014)	Exponen que los beneficios obtenidos de una mejor sincronización de las actividades no necesariamente se distribuyen equitativamente. Dado que los socios pueden tener dificultades para evaluar los costes fijos asociados con la implementación de colaboraciones, los ahorros generados a partir de una mejor coordinación no se reparten en todos los casos.
(Acar & Atadeniz, 2015)	Concluyen que cuanto mayor sea el nivel de incertidumbre de la demanda, mayores serán los beneficios de la integración y proponen una planificación centralizada para la programación táctica y local.
(Albrecht & Stadtler, 2015)	Proponen un enfoque para manejar un modelo S&OP de periodo múltiple con Programación Lineal sin la necesidad de información dual requerida en la descomposición de Dantzig-Wolfe.
(Mason & Villalobos, 2015)	Presentan una coordinación descentralizada de producto fresco a partir de la descomposición de Dantzig-Wolfe. Sin embargo, desafortunadamente, esta formulación puede no ser tan atractiva para los agricultores debido a su transparencia reducida, la percepción de falta de control por parte de los agricultores que permite que el subastador defina la asignación final, y que los precios de compensación del mercado no están claramente determinados.
(Bajgiran et al., 2016)	Implementan un algoritmo para superar el problema habitual del método de subgradiente que la solución propuesta en el dual no es válida en el principal. También concluye que, si se aumentan los puntos de desacoplamiento, los resultados se deterioran con respecto a una solución centralizada.
(Jia et al., 2016)	Coordinan mediante la generación de diferentes planes, el de mejor beneficio y el de mejor servicio, donde el operador de transporte evalúa si su propio beneficio puede aumentarse al proponer un plan de recogidas distinto del plan de entrega solicitado por el fabricante. El 3PL comparte sus beneficios con el fabricante y los autores agregan una función de penalización para garantizar la convergencia a un plan conjunto.
(Zoghliami et al., 2016)	Presentan la coordinación entre un plan de aguas abajo y el plan de aguas arriba con un plan de descuento ponderado por la variación solicitada por cada cliente.

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 3-13 incluye un grupo de contribuciones basadas en el hecho de que todos los miembros de la CdS conocen las estructuras de todos los productos. Esta situación suele darse en la industria automotriz, donde la estructura del producto es conocida por toda la CdS. Estos trabajos destacan por aplicar metaheurística para seleccionar una propuesta entre las distintas alternativas planteadas. Excepto el trabajo de Reiss et al. (2014) donde se plantea una limitación de la capacidad disponible de los recursos utilizados, el resto plantea modelos sin limitación de capacidad.

Tabla 3-13: Aportaciones de los trabajos revisados donde todos los miembros de la CdS conocen las estructuras de todos los productos.

Referencia	Novedades
(Homberger, 2010)	Desarrolla un método de recocido simulado basado en una codificación binaria redundante para el MLULSP
(Homberger et al., 2010)	Presentan una matriz de feromonas conjunta como método de coordinación, las feromonas representan el ranking de la valoración de las propuestas con la regla de votación Borda Maximin.

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

(Homberger & Gehring, 2011)	Presentan la regla de votación Borda Maximin que maximiza el nivel de bienestar del miembro más desfavorecido del grupo para seleccionar propuestas y logra evitar un estancamiento temprano del proceso de negociación.
(Homberger, 2011)	Utiliza como mecanismo de coordinación un algoritmo de evolución junto con el criterio de Rawls para evaluar los votos de los agentes a las propuestas hechas por un mediador.
(Buer et al., 2013)	Presentan un gráfico de búsqueda simplificado para las distintas soluciones codificadas que mejora en comparación con trabajos anteriores.
(Ziebuhr et al., 2013)	Presentan como herramienta de coordinación un procedimiento de restablecimiento parcial en el recido simulado para poder superar los desacuerdos entre las entidades de manera más fácil, reiniciando la búsqueda de vez en cuando a soluciones anteriores y discriminando aleatoriamente a algunos agentes durante el proceso de negociación.
(Reiss & Buer, 2014)	Presentan un enfoque de coordinación que supera a la planificación aguas arriba en pruebas computacionales, pero destacan algunas deficiencias cuando se consideran los tiempos de preparación.
(Buer et al., 2015)	Introducen una coordinación mediante pagos compensatorios a partir del valor de Shapley, en un problema de tamaño de lote entre organizaciones, donde algunas entidades pueden producir los mismos artículos. Funciona mejor para instancias pequeñas y medianas.
(Eslkizi et al., 2015)	Presentan el recido simulado para organizar el proceso de negociación y para evitar una solución o negociación local óptima. Integran pagos compensatorios calculados a partir del valor de Shapley. El problema permite que más de una entidad pueda suministrar los productos.
(Homberger et al., 2015)	Proponen un método de pagos compensatorios a través de un procedimiento de votación modificado, que acepta temporalmente soluciones que no mejoran, y negocia pagos adicionales que conducen a soluciones superiores para todas las entidades.
(Ziebuhr et al., 2015)	Utilizan la heurística de recido simulado para asignar productos a entidades rivales y coordinar planes de producción entre diferentes proveedores.

Fuente: Elaboración propia.

De entre las diferentes herramientas presentadas para actualizar el multiplicador de Lagrange se destaca unas contribuciones que combinan la heurística del método de subgradiente con una regresión cuadrática lineal de la restricción relajada (Wenzel et al., 2016a, 2016b). Por otro lado, la contribución que propone una modificación de la descomposición de Dantzig-Wolfe (Albrecht et al., 2015) sin la necesidad de la figura del mediador. Otros trabajos destacan por extrapolar normas o sistemas a mecanismos de coordinación, como la aplicación de la norma de Tchebycheff (Agnētis et al., 2016) o la extensión de la coordinación del sistema inmune a la cadena de suministro (Lu et al., 2012).

Del análisis de estos trabajos sobre los mecanismos de coordinación, se comienza a vislumbrar su aplicación industrial en ciertos sectores. Los mecanismos de coordinación parecen estar pasando de ser un tema de investigación a un producto comercial. Algunos de los trabajos encontrados describen posibles aplicaciones de mecanismos de coordinación en dichos entornos, pero sin llegar a ser investigación empírica que describa los resultados de la implantación y del uso.

Hay cuestiones que están pendientes, como pueden ser el análisis de la distribución de beneficios de modo equitativo entre los miembros de la cadena de suministro, el comportamiento organizacional, los aspectos culturales en el diseño de la CdS, la renegociación de planificaciones en el procedimiento de horizontes rodantes o el concepto de cubrir varias fases de la colaboración con los mecanismos de coordinación que no se han identificado en la revisión de la literatura realizada. La declaración de Stadtler de que "las empresas son reacias a compartir información y considerar la compensación a los miembros de la CdS como requerimiento para lograr una situación de beneficio mutuo del resultado de la coordinación"

permite abrir otra línea de investigación que confirme la afirmación y ayude a identificar acciones adecuadas para la aplicación de los mecanismos de coordinación en las empresas.

3.5 Conclusiones y futuros trabajos

Este capítulo presenta el resultado de una revisión sistemática de literatura de modelos de programación matemática con un mecanismo de coordinación para la toma de decisiones descentralizada desde el 2006 hasta 2016. La mayoría de los modelos revisados solo tienen en cuenta los niveles tácticos y operativo. Además, los trabajos revisados buscan principalmente una solución que se acerque a la solución encontrada con una coordinación centralizada. Por otro lado, se debe destacar la importante presencia de trabajos que han utilizado el mecanismo de coordinación con el requisito de un mediador o un agente neutral. Pocos de ellos han aplicado una coordinación bajo el procedimiento de horizontes rodantes. Los mecanismos de coordinación se han estudiado principalmente sin un sector específico, excepto algunos trabajos para la industria de la madera, el sector petroquímico y automoción. Los resultados han sido probados principalmente en casos específicos, por lo tanto, existe la oportunidad de extender los mecanismos de coordinación a una propuesta general y aplicarlos a otros sectores industriales.

Del análisis se resalta la falta de trabajos con estructuras de producto complejas y representaciones diferentes a Gozinto. No se ha identificado ningún trabajo que estudie los mecanismos de coordinación o de incentivos con estructura de producto o procesos alternativos, como aporta el modelado *Generic Materials and Operations Planning* (GMOP) (García-Sabater et al., 2013). Por lo tanto, se abre la posibilidad de aplicar la modelización basada en *strokes* en los distintos tipos de mecanismos de coordinación identificados (subastas, jerárquicos, descomposición matemática y metaheurísticas).

Las subastas, como por ejemplo el mecanismo de VCG (second-Price sealed-bid, Vickery–Clarke–Groves auction (Vickrey, 1961)) muestran susceptibilidad a la colusión y otras patologías que lo hacen indeseable en la práctica, según afirman Mason et al. (2015). Por otro lado, las subastas combinatorias requieren de mayor requerimiento computacional que la descomposición matemática o la metaheurística. Los mecanismos jerárquicos presentan resultados sesgados en función de la primera propuesta realizada, aunque implican una mejora respecto de la no coordinación. Por lo que, para el desarrollo de esta tesis, se selecciona las descomposiciones matemáticas con los modelados basados en *stroke* para seguir avanzando en esta investigación, dejando la aplicación de metaheurística para futuras líneas de investigación.

Por otro lado, dentro de la descomposición matemática, se destaca la importancia de la descomposición de Lagrange como herramienta para generar modelos matemáticos susceptibles de gestionar subproblemas y generar mecanismos de coordinación distribuidos según se desprende de su alta presencia en los trabajos estudiados. Por otro lado, no se ha encontrado su desarrollo en la formulación GMOP. Por lo que, para el desarrollo de esta tesis, se selecciona su análisis, reservando para futuras líneas de investigación las otras diferentes

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

herramientas identificadas de realizar la descomposición matemática (Dantzig-Wolfe, Benders, etcétera)

La revisión sistemática de literatura sobre mecanismos de coordinación distribuida identifica la oportunidad de estudiar la aplicación de la descomposición de Lagrange en la formulación GMOP, como línea de trabajo para lograr generar un adecuado mecanismo de coordinación.

Otras líneas futuras de investigación permanecen abiertas, como ampliar la investigación sobre mecanismos de coordinación a nivel estratégico, las situaciones de más de dos niveles y la evaluación de posibles comportamientos oportunistas en los mecanismos de coordinación propuestos. Además, los mecanismos de coordinación deben tener en cuenta los planes propuestos en los tramos anteriores en los que se planifica en cada nueva coordinación.

Capítulo 4: Relajación Lagrangiana del modelo de Planificación de Operaciones y Materiales Genérico³

4.1 Introducción

Este capítulo presenta el estudio sobre la aplicación de la relajación de Lagrange en la formulación GMOP (García-Sabater et al., 2013). El capítulo anterior destaca el uso de la descomposición de Lagrange en los mecanismos de coordinación. Pero según el mejor de nuestros conocimientos, no hay una publicación científica que recoja una aplicación de la relajación Lagrangiana para la formulación de GMOP. Por lo que se procede a realizar su análisis antes de continuar con la generación de un mecanismo de coordinación en entornos de redes distribuidas.

Kelly y Zyngier (2008) propusieron la descomposición como una forma natural de lidiar con problemas grandes. La idea detrás de la descomposición es dividir el problema general en una serie de subproblemas más pequeños, que son más fáciles de resolver y coordinar estos subproblemas a través de un problema maestro (Kong et al., 2014). Un método bien estudiado de descomposición mediante la aplicación de la “*Lagrangian Relaxation*” (LR) (Fisher, 1985).

El resto del capítulo está estructurado de la siguiente manera: primero, se presenta una breve introducción a la formulación GMOP; segundo, se presenta una descripción de la relajación de Lagrange; tercero, se presenta el método del subgradiente aplicado para la formulación GMOP; en cuarto lugar, se presentan los resultados experimentales y finalmente, el capítulo finaliza con las conclusiones y propuestas de trabajos futuros.

4.2 Introducción a la formulación GMOP

Una visión global de la cadena de suministro incluye la selección de alternativas entre ubicaciones, productos, procesos, transportes y proveedores (Stadtler et al., 2008). Estas alternativas se pueden modelar con la formulación de la *Planificación de operaciones y materiales genéricos* (GMOP) (García-Sabater et al., 2013). Por lo tanto, un modelado con *strokes* permite gestionar conjuntamente la lista de materiales (BOM) y la lista de procesos (BOP). Permite la representación de problemas con procesos paralelos, la gestión alternativa de envases, la descomposición de productos y otras posibilidades inherentes al uso de *strokes*. Es más versátil que la estructura de Gozinto, según aporta Maheut (2013). Es un MLCLSP (multinivel, capacitado, problema de tamaño de lote) donde se incorpora la estructura del producto y el proceso.

³ Una versión previa de este capítulo fue presentada en el *11th International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management* celebrado en Valencia en 2017. Y ha servido para la realización de un artículo científico “*Lagrangian relaxation of the generic materials and operations planning model*”, publicado en la revista “*Central European Journal of Operations Research (CEJOR)*” (Rius-Sorolla et al., 2018a).

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

La formulación del GMOP es una representación del problema de lotificación, multinivel, multiestructura, multiperiodo, con capacidad limitada (Garcia-Sabater et al., 2013). Supera la limitación de la estructura de Gozinto con el uso de los *strokes* (Coronado-Hernández et al., 2010; Maheut, 2013). Y dado que los problemas de tamaño de lote con capacidad limitada han demostrado ser NP-Hard, incluso para el caso de un solo producto (Bitran et al., 1982), la formulación GMOP es probablemente un problema NP-Hard.

En cuanto a la flexibilidad de la formulación GMOP, se debe destacar que permite detallar procesos alternativos, así como la ubicación del producto con el empaquetado o el tipo de embalaje utilizado (Maheut, Garcia-Sabater, & Mula, 2012). Permite evaluar procesos alternativos, estructuras de productos alternativas (Coronado-Hernández et al., 2017; Maheut, 2013), co-productos (Coronado-Hernández, 2016) o recursos alternativos (Coronado-Hernández et al., 2010). Y según el mejor de nuestros conocimientos, no se ha tratado de resolver los problemas con la formulación GMOP mediante la relajación Lagrangiana. En otros tipos de modelados equivalentes, la relajación Lagrangiana se ha utilizado satisfactoriamente (Attanasio et al., 2006; Jeong et al., 2009; Kong et al., 2014; Lau et al., 2011; Lu et al., 2012; Pukkala et al., 2009; Walther et al., 2008).

La lista de índices, parámetros y variables utilizados en GMOP se pueden ver en la Tabla 4-1. La función principal es un equilibrio entre los costes del mantenimiento de inventario, las penalizaciones por demoras en el servicio, la preparación del lote y las operaciones, como se muestra en la Ecuación (4.1). Bajo las restricciones en las Ecuaciones (4.2) - (4.5). Las restricciones de las Ecuaciones (4.2) son el equilibrio de stock y conecta la parte logística (stocks, retrasos y demanda) con las operaciones (consumo de componentes y creación de nuevos productos). Las restricciones de las Ecuaciones (4.3) definen la limitación de capacidad de los recursos. Las restricciones de las Ecuaciones (4.4) establecen el requisito de preparación de lote cuando se fabrica en el periodo t con el *stroke* k . Finalmente, el conjunto de restricciones de las Ecuaciones (4.5) establecen los requisitos para las variables.

Tabla 4-1: Índices, parámetros y variables utilizados en GMOP.

Índice	
i	Índice de SKU (incluye producto, embalaje y ubicación)
t	Índice de periodos de planificación
r	Índice de recursos
k	Índice de <i>strokes</i>
j	Índice de actualización del multiplicador de Lagrange
Parámetros	
$D_{i,t}$	Demanda de SKU i en periodo t
$H_{i,t}$	Coste de almacenar una unidad de SKU i en el periodo t
$CO_{k,t}$	Coste del <i>stroke</i> k en periodo t
$CS_{k,t}$	Coste de preparación del <i>stroke</i> k en el periodo t
$CB_{i,t}$	Coste de compra SKU i en periodo t
$SO_{i,k}$	Número de unidades del SKU i que genera el <i>stroke</i> k
$SI_{i,k}$	Número de unidades del SKU i que consume el <i>stroke</i> k
LT_k	Tiempo de espera del <i>stroke</i> k

$KAP_{r,t}$	Capacidad disponible del recurso r en el periodo t (en unidades de tiempo)
M	Un número suficientemente grande
$TO_{k,r}$	Capacidad del recurso r requerida para realizar una unidad del <i>stroke</i> k (en unidades de tiempo)
$TS_{k,r}$	Capacidad requerida del recurso r para la preparación del <i>stroke</i> k (en unidades de tiempo)
σ_j	Constante utilizada para calcular el multiplicador de Lagrange
Variables	
$z_{k,t}$	Cantidad de <i>strokes</i> k que se ejecuta en el periodo t
$\delta_{k,t}$	=1 si <i>stroke</i> k se realiza en el periodo t (0 en caso contrario)
$w_{i,t}$	Cantidad de compra de SKU i en el periodo t
$x_{k,t}$	Nivel de inventario de SKU i disponible al final del periodo t
$u_{r,t}^j$	Multiplicadores de Lagrange

Fuente: Elaboración propia basado en Garcia-Sabater et al. (2013).

$$Z_P: \min \sum_t \sum_i H_{i,t} x_{i,t} + \sum_t \sum_k (CS_{k,t} \delta_{k,t} + CO_{k,t} z_{k,t}) + \sum_t \sum_i CB_{i,t} w_{i,t} \quad (4.1)$$

$$x_{i,t} = x_{i,t-1} - D_{i,t} + w_{i,t} - \sum_k SI_{i,k} z_{k,t} + \sum_k SO_{i,k} z_{k,t-LT_k}, \forall i, t \quad (4.2)$$

$$\sum_k TS_{k,r} \delta_{k,t} + \sum_k TO_{k,r} z_{k,t} \leq KAP_r, \forall r, t \quad (4.3)$$

$$z_{k,t} - M \delta_{k,t} \leq 0, \forall k, t \quad (4.4)$$

$$x_{i,t} \geq 0; w_{i,t} \geq 0, \forall i, t; z_{k,t} \in \mathbb{Z}^+; \delta_{k,t} \in \{0,1\} \forall k, t \quad (4.5)$$

La aplicación de la relajación de Lagrange en la formulación GMOP puede facilitar la resolución del modelo y también, puede generar mecanismos de coordinación entre los subproblemas. La eliminación de ciertas restricciones debe permitir un modelado de mayor facilidad de resolución, pero también la descomposición del modelado en subproblemas relacionados. Estos subproblemas pueden entenderse como las entidades independientes que deben coordinarse. En este capítulo se analizará el comportamiento de los multiplicadores de Lagrange calculados con diferentes métodos. En capítulos posteriores se presenta la transformación de la formulación GMOP con la relajación de Lagrange en un mecanismo de coordinación distribuido.

4.3 Relajación de Lagrange

La relajación de Lagrange permite eliminar ciertas restricciones del modelado mediante la penalización de sus incumplimientos en la función objetivo. Los incumplimientos de las restricciones son ponderados en la función objetivo mediante coeficientes. Estos coeficientes son denominados multiplicadores de Lagrange.

Con el fin de presentar el procedimiento de aplicación de la relajación de Lagrange, se presenta una formulación genérica. La formulación consta de una función objetivo que se puede apreciar

en la Ecuación (4.6), y un conjunto de restricciones, expresadas con las Ecuaciones (4.7) a (4.9). Esta es una formulación primal o principal tal y como es explicada por Conejo et al. (2006).

$$Z = \min \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^n C_{ik} x_{ik} \quad (4.6)$$

$$s. t. \sum_{i=1}^m A_i x_{ik} \leq b_k; k = 1, \dots, n \quad (4.7)$$

$$\sum_{k=1}^n B_k x_{ik} \leq c_i; i = 1, \dots, m \quad (4.8)$$

$$x_{ik} \geq 0 \text{ and integer} \quad (4.9)$$

Las n restricciones de las Ecuaciones (4.7) son las que se desean relajar o eliminar con tal de tener un problema más fácil. Se debe entender que la formulación sin estas restricciones es de más fácil solución (Lemaréchal, 2001). Estas restricciones son eliminadas de la formulación a cambio de introducir una penalización de su incumplimiento en la nueva función objetivo. Esta nueva formulación representa el problema primal descompuesto (Conejo et al., 2006), $Z_D(u^j)$, o de Lagrange (Fisher, 2004) que consta de las Ecuaciones (4.8), (4.9), (4.10) y (4.11) para cada iteración j . El conjunto de multiplicadores de Lagrange de cada iteración j para las n restricciones relajadas son $u^j = (u_1^j, \dots, u_n^j)$. Fisher (1985) aporta que se pueden interpretar los multiplicadores de Lagrange como los costes que pagará la función objetivo por el incumplimiento de las restricciones eliminadas.

$$Z_D(u^j) = \min \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^m C_{ik} x_{ik} + \sum_{k=1}^n u_k^j \left(\sum_{i=1}^m A_i x_{ik} - b_k \right) \quad (4.10)$$

$$u_k^j \geq 0; k = 1, \dots, n; \quad (4.11)$$

La solución del problema primal descompuesto permite encontrar una cota inferior al problema primal, tal y como se recoge en la Ecuación (4.15). Si existe una solución óptima a la Ecuación (4.6), constituida por un conjunto de valores de x_{jk} , llamados x_{jk}^* , que cumple con todas las restricciones, Ecuaciones (4.7)-(4.9). Esta solución óptima tiene un valor de Z definido en la Ecuación (4.12). Esos valores x_{jk}^* aplicados en la Ecuación (4.13) dan una cota inferior o igual a Z . Esta condición se cumple ya que los términos añadidos son siempre negativos. Los multiplicadores de Lagrange son siempre positivos y las penalizaciones de las restricciones relajadas serán menores o iguales a 0 ya que todos los x_{jk}^* cumplen con esas restricciones relajadas. $Z_D(u^j)$ es el mínimo valor de la función primal descompuesta para unos multiplicadores de Lagrange dados que se puede apreciar en la Ecuación (4.10). Por lo tanto, se cumple la Ecuación (4.14). Para concluir, se puede afirmar que el valor mínimo de la función

primal descompuesta será una cota inferior de la función primal, para todo conjunto de posibles multiplicadores de Lagrange que se recoge en la Ecuación (4.15).

$$Z = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^m C_{ik} x_{jk}^* \quad (4.12)$$

$$Z \geq \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^m C_{ik} x_{jk}^* + \sum_{k=1}^n u_k^j \left(\sum_{i=1}^m A_i x_{jk}^* - b_k \right) \quad (4.13)$$

$$\sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^m C_{ik} x_{jk}^* + \sum_{k=1}^n u_k^j \left(\sum_{i=1}^m A_i x_{jk}^* - b_k \right) \geq Z_D(u^j) \quad (4.14)$$

$$Z \geq Z_D(u^j) \quad (4.15)$$

Una adecuada propuesta de multiplicadores de Lagrange permite que el valor de la función primal descompuesta $Z_D(u^j)$ sea una mejor cota inferior o incluso iguale a la función primal, Z tal y como se recoge en la Ecuación (4.17). En las sucesivas iteraciones de actualización de los multiplicadores de Lagrange con índice j se intenta identificar aquellos multiplicadores que logren encontrar el máximo valor a la función objetivo primal descompuestas que se puede apreciar en la Ecuación (4.16). Este problema es llamado dual de Lagrange (Gupta et al., 1999) con las Ecuaciones (4.16), (4.8), (4.9) y (4.11).

$$Z_D = \max_j Z_D(u^j) = \max_j \min \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^m C_{ik} x_{ik} + \sum_{k=1}^n u_k^j \left(\sum_{i=1}^m A_i x_{ik} - b_k \right) \quad (4.16)$$

$$Z \geq Z_D \geq Z_D(u^j) \quad (4.17)$$

A partir del teorema de dualidad, tal y como recogen Conejo et al. (2006), se establece que si existe una solución mínima al problema primal el valor de la función objetivo es igual al valor de la función objetivo del problema dual, Z_D , obtenido a partir de la mejor propuesta de multiplicadores de Lagrange que se refleja con la Ecuación (4.18).

$$Z = Z_D \quad (4.18)$$

El teorema de la dualidad débil establece que en el caso de que el conjunto de soluciones del problema primal no sean diferenciables, el valor de la función objetivo en la solución del problema dual proporciona un límite inferior al valor de la función objetivo en la solución del problema primal, tal y como recogen Conejo et al. (2006), que se refleja en la Ecuación (4.19). Esta diferencia se llama brecha de dualidad o gap (Conejo et al., 2006) que se define en la Ecuación (4.20).

$$Z \geq Z_D \quad (4.19)$$

$$\text{gap} = \frac{|Z_D - Z|}{Z} \quad (4.20)$$

Los multiplicadores de Lagrange se pueden actualizar por varios procedimientos (Conejo et al., 2006). En este capítulo se utilizan 2 métodos dentro del procedimiento del subgradiente, al ser el procedimiento más utilizado en la investigación científica (Fisher, 2004). Para las funciones no diferenciables, los subgradientes juegan equivalente papel que los gradientes en las funciones diferenciables. La definición del concepto de subgradiente se puede encontrar en Conejo et al. (2006). En el procedimiento del subgradiente los multiplicadores son actualizados, en cada iteración j , con el valor mayor de 0 de su valor previo más la multiplicación de un paso s^j y el incumplimiento h_k^j de la restricción relajada k . Esta actualización de los multiplicadores de Lagrange se puede observar en la Ecuación (4.21). Los pasos s^j deben cumplir las condiciones de las Ecuaciones (4.22). La convergencia del procedimiento del subgradiente se puede encontrar en el trabajo de Held et al. (1974) y en el trabajo de Polyak (1969).

$$u_k^{j+1} = \max \left\{ 0, u_k^j + s^j h_k^j \right\} = \max \left\{ 0, u_k^j + s^j \left(\sum_{i=1}^m A_i x_{ik} - b_k \right) \right\} \forall k \quad (4.21)$$

$$\lim_{j \rightarrow \infty} s^j \rightarrow 0 \text{ y } \sum_{j=1}^{\infty} s^j \rightarrow \infty \quad (4.22)$$

Una propuesta como método de actualización del paso s^j que cumple con las condiciones de las Ecuaciones (4.22), se puede encontrar en el trabajo de Conejo et al. (2006) con la Ecuación (4.23). El paso se actualiza en cada iteración de j , con unos coeficientes a y b constantes. Conejo et al. (2006) proponen como valores para estos coeficientes, el valor de uno para a y una décima de unidad para b , que cumplen con las condiciones de las Ecuaciones (4.22).

$$s^j = \frac{1}{a + bj} \quad (4.23)$$

Held et al. (1974) proponen como método de actualización del paso s^j con la Ecuación (4.24). Fisher (2004) remarca que es el método más comúnmente utilizado de la revisión de la literatura que realiza. σ_j es un coeficiente que debe satisfacer la condición $0 < \sigma_j \leq 2 \forall j$. Z^* es una cota

superior de la función objetivo del problema primal recogido en la Ecuación (4.12). Y $Z_D(u^j)$ es el valor de la función objetivo de la formulación del problema primal descompuesto reflejado en la Ecuación (4.10), para el conjunto de multiplicadores de Lagrange u^j , en la iteración j y cumple con las restricciones expresadas en las Ecuaciones (4.8) y (4.9), y (4.11).

$$s^j = \frac{\sigma_j (Z^* - Z_D(u^j))}{\sum_{k=1}^n (\sum_{i=1}^m A_i x_{ik} - b_k)^2} \quad (4.24)$$

Respecto del valor de σ_j , Held et al. (1974) recomiendan como regla general, establecer $\sigma_j = 2$ para $2p$ iteraciones iniciales, donde p es una cuantificación del tamaño del problema, y luego reducir sucesivamente a la mitad σ_j y el número de iteraciones, hasta un número de iteraciones predefinidas. Entonces, σ_j se reduce a la mitad en cada iteración hasta que s^j alcanza un valor pequeño predefinido. Held et al. (1974) señalaron que este método no cumple la segunda restricción de las Ecuaciones (4.22) de $\sum_{j=0}^q s^j \rightarrow \infty$ y que casi nunca converge al óptimo, pero genera buenos límites a la función principal. Guignard (2003) comenta que la convergencia del método del subgradiente es impredecible y que en algunos problemas converge rápidamente, con suficiente fiabilidad, mientras que en otros problemas tiene un comportamiento errático. Fisher (2004) aconseja comenzar con $\sigma_1 = 2$ y reducir a la mitad σ_j siempre que $Z_D(u^j)$ no haya podido mejorar el límite inferior en un número fijo de iteraciones. Esta regla tampoco garantiza satisfacer los requisitos de la Ecuación (4.22) pero funciona bien empíricamente pese a su simplicidad, según comenta dicho autor.

El método del subgradiente tiene varias desventajas. En primer lugar, en general, no genera soluciones para la función principal, al menos, soluciones factibles cercanas a la solución óptima. Las soluciones propuestas para la función dual generalmente no son válidas en la función primal, ya que la condición relajada generalmente no se cumple (Sherali et al., 1996). La razón es que los cambios marginales en los multiplicadores de Lagrange pueden llevar a valores enteros diferentes y luego a cambios en la función objetivo dual (Gunnerud et al., 2010). En segundo lugar, generalmente al principio, hay un zigzagueo y luego una convergencia lenta, más notable con valores altos de σ_j . Boyd et al. (2008) estudiaron los efectos de σ_j cuando toma los valores de 0,05, 0,01 y 0,005. Dentro de sus conclusiones informan que cuando los valores son altos, el método tiene una convergencia más rápida pero mayores oscilaciones iniciales y converge hacia un gap mayor. Finalmente, es necesaria inicialmente una cota superior de la función objetivo primal, por lo que se debe usar una heurística para obtener el valor inicial de F^* . Sabiendo que Held et al. (1974) observaron que el resultado final no parecía depender de este valor. Pero el método del subgradiente tiene la ventaja de que su formulación matemática permite controlar la convergencia todo el tiempo y tiene la bondad de la solución encontrada (Araújo et al., 2015). Además, es simple y funciona en la mayoría de los problemas (Pukkala et al., 2009).

Para aplicar la relajación de Lagrange con el procedimiento del subgradiente se deben seguir una serie de pasos:

1. Se deben seleccionar las restricciones a relajar.
2. Se debe seleccionar el método de actualización del paso s^j . En caso de aplicar el método recogido por Fisher (2004), se tiene que definir una cota superior inicial de la función principal, Z^* , el valor de inicio de σ_j y el número de iteraciones antes de reducirlo a la mitad. En caso de aplicar el método propuesto por Conejo et al. (2006) los valores de los coeficientes a y b de su formulación.
3. Se tienen que establecer los criterios de finalización, tales como el número de iteraciones totales q o el gap dual mínimo deseado (en el método recogido por Fisher (2004) se puede establecer el valor más pequeño de σ_j para finalizar el proceso. Valores pequeños de σ_j implican variaciones muy pequeñas en los multiplicadores de Lagrange).
4. Se debe dar unos valores iniciales a los multiplicadores de Lagrange. Una alternativa es que sean 0 y permitir al método que calcule el primer valor de la función objetivo $Z_D(u^1)$ de la Ecuación (4.6) y las siguientes propuestas para los multiplicadores de Lagrange.

En el siguiente apartado se aplica la relajación de Lagrange a la formulación GMOP. Se comparará la actualización del paso entre el método recogido por Fisher (2004) con el método propuesto por Conejo et al. (2006). La propuesta de actualización de Conejo et al. (2006) cumple las condiciones de convergencia de Held et al. (1974) y el método recogido por Fisher (2004) funciona empíricamente, pero no cumple las condiciones de convergencia.

4.4 Aplicación de la relajación Lagrangiana a la formulación GMOP

Para la aplicación de la LR a la formulación GMOP, el primer paso es seleccionar el conjunto de restricciones a relajar de la formulación GMOP que permita generar un modelo más fácil de solucionar. Las distintas restricciones del modelo GMOP se comentan a continuación, a fin de seleccionar las restricciones a las que se aplicará la restricción de Lagrange, que son:

Balance de inventario, Ecuaciones (4.2)

Limitación de capacidad, Ecuaciones (4.3)

Requisito de preparación, Ecuaciones (4.4)

Limitaciones de las variables, Ecuaciones (4.5)

Las primeras relajaciones posibles son las restricciones de los balances de inventario, Ecuaciones (4.2). Estas relajaciones permiten descomponer el problema en subproblemas, algunos relacionados con la producción de componentes y otros con la administración logística de satisfacer la demanda.

Otra alternativa es la relajación de las limitaciones de la capacidad, Ecuaciones (4.3). Estas relajaciones simplifican el problema al desacoplar cada recurso y periodo, de modo que los diferentes productos no tienen la restricción conjunta de compartir el recurso, lo que permite ver el problema como un conjunto de subproblemas de un producto, mono-recurso o mono-

localidad. Gupta & Maranas (1999) concluyen que en el modelo de McDonald y Karimi (1997), al relajar las limitaciones de capacidad, estos subproblemas no son NP-Hard.

La siguiente alternativa es la relajación de las restricciones que aparece en las Ecuaciones (4.4). Estas relajaciones desconectarán el requisito de preparación, por lo que los costes de preparación no se tendrán en cuenta al optimizar la función. La función recomendará la operación solicitada por la demanda sin demora o almacenamientos siempre que haya capacidad disponible (Ecuaciones 4.3).

Por último, la relajación de las restricciones expresadas en las Ecuaciones (4.5) permitiría valores no enteros en las cantidades producidas, en las operaciones a realizar o *strokes* y las variables de preparación. Se deben añadir nuevas restricciones con tal de limitar que estas variables tomen valores no negativos. El modelado será entonces totalmente continuo, solucionable con el método simplex (Nelder et al., 1965).

Gupta y Maranas (1999) comentan que obtienen límites mejores con la relajación de las limitaciones de la capacidad disponible de los recursos, que la relajación de las otras restricciones del modelo de planificación de producción a medio plazo de McDonald y Karimi (1997), en ciertos experimentos numéricos.

En este trabajo, se selecciona aplicar la relajación a las restricciones de limitación de la capacidad disponible de cada recurso y cada periodo, Ecuaciones (4.3). Se deja para futuras investigaciones analizar los resultados que se obtendrían con la relajación de las otras restricciones. La formulación de la función dual se puede observar en la Ecuación (4.25), manteniéndose las restricciones de las Ecuaciones (4.2), (4.4), (4.5) y añadiendo el conjunto de restricciones de las Ecuaciones (4.26).

$$Z_d: \max_u \min \sum_t \sum_i H_{i,t} x_{i,t} + \sum_t \sum_k (CS_{k,t} \delta_{k,t} + CO_{k,t} z_{k,t}) + \sum_t \sum_i CB_{i,t} w_{i,t} \quad (4.25)$$

$$+ \sum_r \sum_t u_{r,t}^j \left[\sum_k TS_{k,r} \delta_{k,t} + \sum_k TO_{k,r} z_{k,t} - KAP_{r,t} \right] \\ u_{r,t}^j \geq 0; \forall j, r, t \quad (4.26)$$

La actualización de los multiplicadores de Lagrange u_{rt}^j se hace con el procedimiento del subgradiente, Ecuaciones (4.27). Siendo s^j el paso en cada interacción j y h_{rt}^j es el incumplimiento de cada restricción relajada, Ecuaciones (4.3), de cada periodo y recursos, en cada iteración j . Tal y como se puede observar en las Ecuaciones (4.28).

$$u_{r,t}^{j+1} = \max\{0, u_{r,t}^j + s^j h_{r,t}^j\} \forall r, t \quad (4.27)$$

$$h_{rt}^j = h(u_{r,t}^j) = \left[\sum_k TS_{k,r} \delta_{k,t} + \sum_k TO_{k,r} z_{k,t} - KAP_{r,t} \right] \forall r, t, j \quad (4.28)$$

El término s^j de las Ecuaciones (4.27) se puede calcular mediante la Ecuación (4.29), por el método del subgradiente (Fisher, 2004), o por el método propuesto por Conejo et al. (2006) con la Ecuación (4.23). En la Ecuación (4.29), el paso aumenta con la diferencia entre el mejor valor conocido de la función objetivo primal y el valor de la función primal descompuesto de la Ecuación (4.25) en la iteración j . El paso disminuye por la suma de los cuadrados del incumplimiento de las restricciones relajadas. El factor σ_j tiene las limitaciones de las Ecuaciones (4.30).

$$s^j = \frac{\sigma_j (Z^* - Z_d(u_{r,t}^{j-1}))}{\sum_{r,t} [\sum_k TS_{k,r} \delta_{k,t} + \sum_k TO_{k,r} z_{k,t} - KAP_{r,t}]^2} \quad (4.29)$$

$$0 \leq \sigma_j \leq 2, \forall j \quad (4.30)$$

En este trabajo, se selecciona iniciar el parámetro σ_j con el valor de 2 y si después de 10 iteraciones el resultado no mejora en la Ecuación (4.25), se actualiza el valor de σ_j a su mitad, siguiendo las recomendaciones de Fisher (2004).

A continuación, se presentan pruebas numéricas para poder analizar el comportamiento de las actualizaciones de los multiplicadores de Lagrange con los 2 métodos.

4.5 Experimentos numéricos

Para evaluar los dos métodos, se han implementado los algoritmos en programación C# que recopilan datos aleatorios dentro de los rangos de la Tabla 4-2, generados en una hoja MS EXCEL®, y ejecutan el programa solucionador de optimización comercial, Gurobi Optimizer 7.0®. Todos estos programas se procesan en una máquina virtual de 16 núcleos de procesamiento. Los resultados con la relajación de Lagrange son comparados con la solución óptima propuesta por Gurobi®. Se han generado aleatoriamente 10 conjuntos de datos (disponibles en el Anexo 1), para evaluar ambos métodos de actualización del paso para el cálculo de los multiplicadores de Lagrange por el procedimiento del subgradiente. Se busca identificar el comportamiento de ambos métodos y no se pretende realizar un análisis de sensibilidad de cada uno de los parámetros que exigiría mayor número de ensayos. La Tabla 4-2 muestra los valores de los parámetros que se usan para generar los datos aleatorios.

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

Tabla 4-2: Rango de valores seleccionados para los parámetros en los ensayos.

Parámetros	Valores
i	7
t	10
r	5
k	10
$D_{i,t}$	Aleatorio uniforme de [100,1.000]
$H_{i,t}$	Aleatorio uniforme de [10,20]
$CO_{k,t}$	Aleatorio uniforme de [5,8]
$CS_{k,t}$	Aleatorio uniforme de [5,10]
$CB_{i,t}$	Aleatorio uniforme de [10,20]
$SO_{i,k}$	Aleatorio uniforme de [35,50]
$SI_{i,k}$	Aleatorio uniforme de [4,8]
LT_k	Aleatorio uniforme de [1,2]
$KAP_{r,t}$	Aleatorio uniforme de [400,500]
M	100.000
$TO_{k,r}$	Aleatorio uniforme de [2,5]
$TS_{k,r}$	Aleatorio uniforme de [5,10]

Fuente: Elaboración propia.

Los pasos para la aplicación de la relajación de Lagrange con el procedimiento del subgradiente descritos en este capítulo son:

1. Se deben seleccionar las restricciones a relajar. En este caso se selecciona las restricciones de la capacidad disponible de cada recurso r en cada uno de los periodos t . Por lo tanto, se relajan 50 restricciones de los 5 recursos en los 10 periodos.
2. Se debe seleccionar el método de actualización del paso s^j . En este caso, se utilizan los dos métodos, *Met1* según la propuesta de Fisher (2004) y el *Met2* según la propuesta de Conejo et al. (2006). La Tabla 4-3 enumera los valores de los parámetros utilizados para los dos métodos.
 - a. En el *Met1* se establece como cota superior inicial de la función principal, Z^* , el valor de 300.000 unidades. Este valor es identificado por una resolución previa aproximada de las instancias. El valor inicial de σ_j es de 2 y después de 10 iteraciones se divide a la mitad si no se ha identificado una mejor cota inferior.
 - b. En el *Met2* se establecen los coeficientes de a y de b con la unidad y una décima de unidad respectivamente.
3. Se tienen que establecer los criterios de finalización, tales como el número de iteraciones totales q o el gap dual mínimo deseado. En este caso se establece un total de 1.000 iteraciones para la actualización de los multiplicadores de Lagrange en cada método y se selecciona un gap dual del 1% como punto de referencia.
4. Se debe dar unos valores iniciales a los multiplicadores de Lagrange. En este caso se establece que tengan el valor de 0.

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

Tabla 4-3: Parámetros para los métodos de actualización de los multiplicadores de Lagrange.

Parámetros	Valores
Máximo número de iteraciones de j	1.000
σ_m (Met1)	Valor inicial de 2
Número máximo de iteraciones antes de dividir por la mitad σ_m (Met1)	10
Valor Primal inicial (Met1)	300.000
Valor inicial del multiplicador (Met1 y Met2)	0
a (Met2)	1
b (Met2)	0,1

Met1 método propuesto por Fisher (2004), Met2 método propuesto por Conejo et al. (2006) . Fuente: Elaboración propia.

Para comparar las soluciones a las 10 instancias generadas por la relajación de Lagrange, calculadas con el procedimiento del subgradiente y con los dos métodos propuestos, *Met1* y *Met2*, se van a utilizar 4 criterios:

- El número de iteraciones requeridas para reducir el gap definido en la Ecuación (4.20), a menos del 1% en ambos métodos, denominados "It1% (Met1)" y "It1% (Met2)".
- El número de iteraciones en el que se produce la diferencia máxima entre los gaps de cada método, denominado como "ItMax".
- El número de iteraciones requeridas para que el método propuesto por Conejo et al. (2006) obtenga un gap menor que el obtenido con la propuesta de Fisher (2004), denominado como "ItConejo".
- La distancia que se obtiene entre el límite superior (UB) y la solución óptima (OP), que se define en la Ecuación (4.31) y se denomina "UGAP". La distancia que se calcula entre el límite inferior (LB) y la solución óptima (OP), que se define en la Ecuación (4.32) y se denomina "LGAP". Se registran los valores cuando las iteraciones son de 10, 50, 100, 500 y 1.000 . Estos indicadores se basan en las propuestas de Zhang et al. (2012)

$$UGAP = \frac{2(UB - OP)}{(UB + OP)} \quad (4.31)$$

$$LGAP = \frac{2(OP - LB)}{(OP + LB)} \quad (4.32)$$

Los resultados se pueden ver en la Tabla 4-4, la Tabla 4-5 y la Tabla 4-6.

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

Tabla 4-4: Rendimientos de los procedimientos aplicados para la relajación de Lagrange.

Instancias	It1%(Met1)	It1%(Met2)	ItMax.	ItConejo
1	12	372	27	972
2	17	232	43	247
3	6	569	170	718
4	-	-	48	111
5	-	-	82	-
6	-	999	83	102
7	11	687	18	-
8	-	-	79	431
9	2	354	4	944
10	-	-	26	155

It1%(Met1) iteración cuando el gap con el método recogido por Fisher (2004) vale 1%, *It1%(Met2)* iteración cuando el gap con el método de Conejo et al. (2006) vale 1%, *ItMax* iteración en la que se produce la máxima diferencia entre los gaps de los dos métodos, *ItConejo* iteración cuando el método propuesto por Conejo et al. (2006) tiene menor gap que el método del subgradiente, - cuando no se alcanza el gap o menor gap dentro de las 1.000 iteraciones . Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 4-4 se puede observar cómo el método recogido por Fisher (2004) requiere de menos iteraciones para reducir el gap por debajo del 1% en comparación con el método propuesto por Conejo et al. (2006), en las instancias que logran hacerlo. Se aprecia que después de varias iteraciones el método propuesto por Conejo et al. (2006) puede mejorar el gap obtenido por el método recogido por Fisher (2004), excepto en las instancias 5 y 7. En las instancias 5 y 7, el método propuesto por Conejo et al. (2006) no llega a reducir el gap respecto del obtenido con el método recogido por Fisher (2004) después de 1.000 iteraciones. El promedio de iteraciones necesarias para que el método propuesto por Conejo et al. (2006) obtenga menor gap que el obtenido con el método recogido por Fisher (2004), en las instancias en que ocurre antes de las 1.000 iteraciones, es de 458 iteraciones.

En la instancia 6 el método recogido por Fisher (2004) no logra reducir el gap por debajo del 1% en las 1.000 iteraciones, pero si lo logra el método propuesto por Conejo et al. (2006), en la iteración 999. En la instancia 6, el método propuesto por Conejo et al. (2006) consigue menor gap en comparación con el método recogido por Fisher (2004) a partir de la iteración 102. En las instancias 4, 5, 8 y 10 ninguno de los dos métodos consigue reducir el gap por debajo del 1% antes de las 1.000 iteraciones, y es marcado con “-”.

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

Tabla 4-5: UGAP y LGAP de las instancias con el método del subgradiente.

	UGAP10	UGAP50	UGAP100	UGAP500	UGAP1000	LGAP10	LGAP50	LGAP100	LGAP500	LGAP1000
1 Met1	0,58%	0,41%	0,41%	0,41%	0,41%	0,44%	0,21%	0,17%	0,14%	0,14%
2 Met1	27,53%	0,47%	0,47%	0,47%	0,47%	0,57%	0,30%	0,25%	0,10%	0,10%
3 Met1	0,03%	0,03%	0,03%	0,03%	0,03%	0,13%	0,11%	0,09%	0,03%	0,02%
4 Met1	22,35%	6,51%	6,51%	6,51%	6,51%	4,39%	0,35%	0,23%	0,19%	0,19%
5 Met1	3,32%	1,69%	1,69%	1,69%	1,69%	0,54%	0,21%	0,14%	0,07%	0,07%
6 Met1	2,38%	2,38%	2,38%	2,38%	2,38%	0,30%	0,15%	0,13%	0,12%	0,12%
7 Met1	0,65%	0,28%	0,28%	0,21%	0,21%	0,36%	0,15%	0,14%	0,12%	0,12%
8 Met1	11,88%	3,93%	3,93%	3,93%	3,93%	0,81%	0,23%	0,17%	0,15%	0,15%
9 Met1	0,14%	0,14%	0,14%	0,14%	0,14%	0,13%	0,08%	0,07%	0,06%	0,06%
10Met1	5,43%	5,43%	5,43%	5,43%	5,43%	0,35%	0,12%	0,11%	0,10%	0,10%
AvgMet1	7,43%	2,13%	2,13%	2,12%	2,12%	0,80%	0,19%	0,15%	0,11%	0,11%

UGAP10 Gap superior en la iteración 10, *LGAP10* Gap inferior en la iteración 10, *1 Met1* aplicado el método recogido por Fisher (2004) en la primera instancia, *AvgMet1* valores medios del gap con el método recogido por Fisher (2004). Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-6: UGAP y LGAP de las instancias con el método propuesto por Conejo et al. (2006)

	UGAP10	UGAP50	UGAP100	UGAP500	UGAP1000	LGAP10	LGAP50	LGAP100	LGAP500	LGAP1000
1 Met2	6,90%	3,07%	3,07%	0,45%	0,41%	6,43%	6,43%	4,58%	0,33%	0,13%
2 Met2	6,34%	5,52%	5,17%	0,47%	0,47%	6,73%	6,73%	1,10%	0,10%	0,10%
3 Met2	1,33%	1,33%	1,33%	0,70%	0,03%	1,21%	1,21%	1,21%	0,43%	0,02%
4 Met2	8,11%	8,11%	7,04%	4,54%	4,54%	5,32%	5,32%	2,34%	0,68%	0,26%
5 Met2	3,32%	3,32%	3,32%	2,02%	1,69%	9,54%	9,54%	3,10%	0,56%	0,17%
6 Met2	2,38%	2,38%	1,70%	1,16%	0,82%	6,83%	6,83%	2,27%	0,30%	0,20%
7 Met2	6,32%	4,12%	3,10%	0,82%	0,29%	10,31%	10,31%	10,31%	0,32%	0,16%
8 Met2	7,87%	7,67%	5,41%	1,05%	1,05%	22,62%	22,62%	12,84%	0,34%	0,19%
9 Met2	1,36%	0,91%	0,91%	0,14%	0,14%	0,77%	0,77%	0,77%	0,11%	0,06%
10 Met2	5,43%	3,86%	3,86%	3,86%	3,86%	11,49%	11,49%	11,49%	0,40%	0,16%
AvgMet2	4,94%	4,03%	3,49%	1,52%	1,33%	8,12%	8,12%	5,00%	0,36%	0,14%

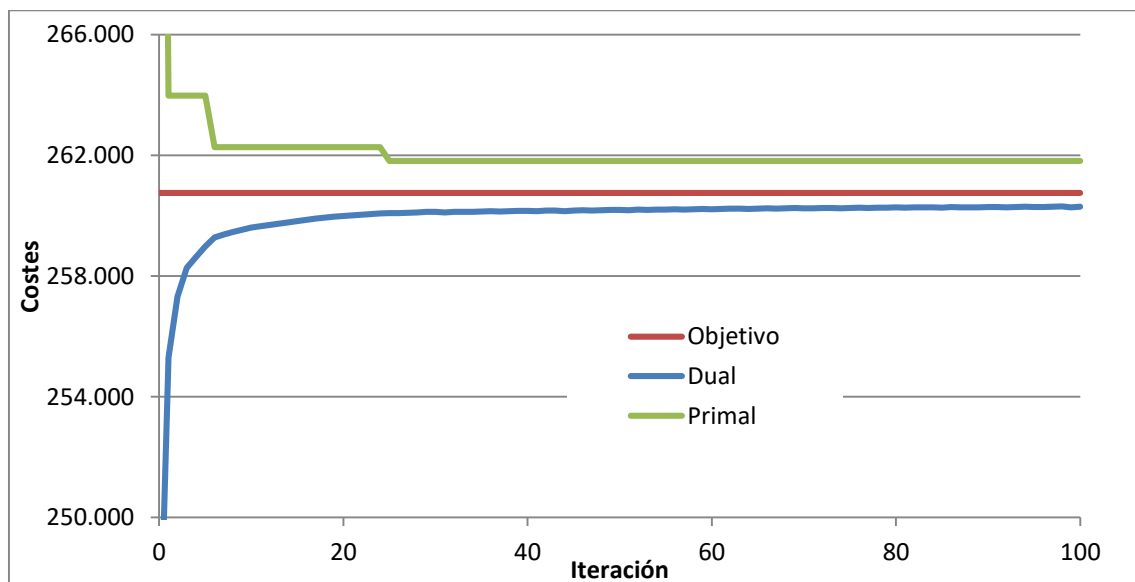
UGAP10 Gap superior en la iteración 10, *LGAP10* Gap inferior en la iteración 10, *1 Met2* aplicado el método propuesto por Conejo et al. (2006), *AvgMet2* valores medios del gap con dicho método. Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 4-5 muestra que el método recogido por Fisher (2004) puede reducir el *UGAP* hasta la iteración 50, pero su mejora se estabiliza en las siguientes iteraciones. Por otro lado, el *UGAP* con el método propuesto por Conejo et al. (2006) que se puede apreciar en la Tabla 4-6, se reduce progresivamente en cada iteración y puede mejorar al método recogido por Fisher (2004) en torno a las 500 iteraciones. El *UGAP* aporta los casos en que las soluciones propuestas en la función dual cumplen con las restricciones relajadas y son válidas en la función primal. Además, la Tabla 4-5 muestra que el *LGAP* se reduce drásticamente con el método recogido por Fisher (2004) antes de las 50 iteraciones. El método propuesto por Conejo et al. (2006) tarda más iteraciones para obtener un *LGAP* equivalente y no logra superar en resultados al método recogido por Fisher (2004) en las 1.000 iteraciones de promedio respecto del *LGAP* que se puede

apreciar en la Tabla 4-6. El LGAP destaca las propuestas de solución de la función dual a partir de los distintos multiplicadores propuestos por cada método. Por lo tanto, el método recogido por Fisher (2004) consigue más rápidamente mayores valores de la función objetivo dual, cota inferior, en comparación con el método propuesto por Conejo et al. (2006) que requiere de más iteraciones.

Con el fin de ayudar a visualizar las observaciones realizadas en las tablas, se muestran las representaciones gráficas de dos de las instancias. La Figura 4-1 muestra los resultados del dual y primal de la formulación GMOP de la primera instancia con el procedimiento del subgradiente con el método recogido por Fisher (2004) en las cien primeras iteraciones. En la Figura 4-1, se puede observar la rápida actualización de la cota inferior, *Dual*, y los únicos tres saltos que se actualiza la cota superior, *Primal*. Al mismo tiempo se pueden observar las distancias que tienen tanto la cota superior como la inferior respecto de una solución óptima propuesta por el programa Gurobi®, *Objetivo*.

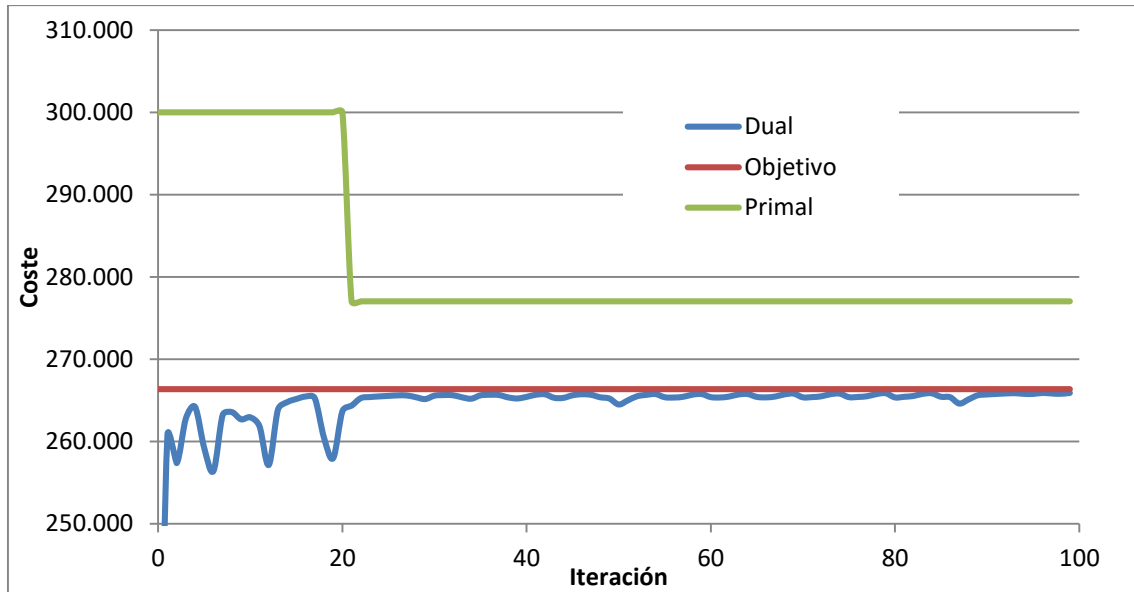
Figura 4-1: Resultados del Dual y Primal del GMOP con el método del subgradiente recogido por Fisher (2004) de la primera instancia.



Objetivo valor de la función objetivo primal a partir de la propuesta óptima de Gurobi®, *Primal* valor de la función objetivo primal obtenida por la solución propuesta al problema dual que cumple las restricciones relajadas, *Dual* valor de la función objetivo dual obtenida en cada iteración. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4-2 se pueden observar los resultados de la octava instancia. Esta instancia es una de las instancias donde ambos métodos no logran reducir el gap por debajo del 1% en las 1.000 iteraciones. En la figura, se ven las oscilaciones iniciales en las propuestas del problema dual, *Dual* y el salto único en la cota superior, *Primal*. La propuesta *Primal* no mejora a lo largo de las iteraciones excepto el salto sobre la iteración veinte con lo que el gap no se reduce por debajo del 1%. Se puede observar que el LGAP tome valores por debajo del 1% pero no así el UGAP.

Figura 4-2: Resultados del Dual y Primal del GMOP con el método del subgradiente recogido por Fisher (2004) de la octava instancia.

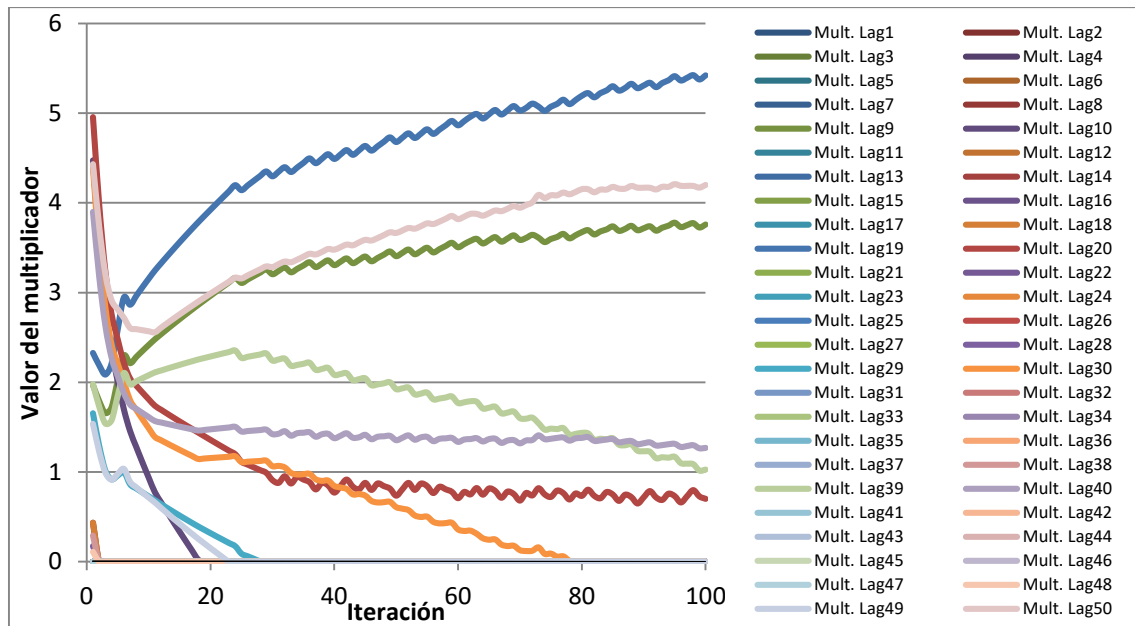


Objetivo valor de la función objetivo primal a partir de la propuesta óptima de Gurobi®, *Primal* valor de la función objetivo primal obtenida por la solución propuesta al problema dual que cumple las restricciones relajadas, *Dual* valor de la función objetivo dual obtenida en cada iteración. Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, se puede observar a partir de las dos instancias seleccionadas como el método recogido por Fisher (2004) consigue una convergencia en los multiplicadores de Lagrange en las sucesivas iteraciones. Esta convergencia se observa tanto en la primera instancia con una rápida convergencia de la cota inferior o en el gap inferior al 1%, como en la octava instancia que presenta oscilaciones y ninguno de los dos métodos consigue un gap inferior al 1% en las 1.000 iteraciones.

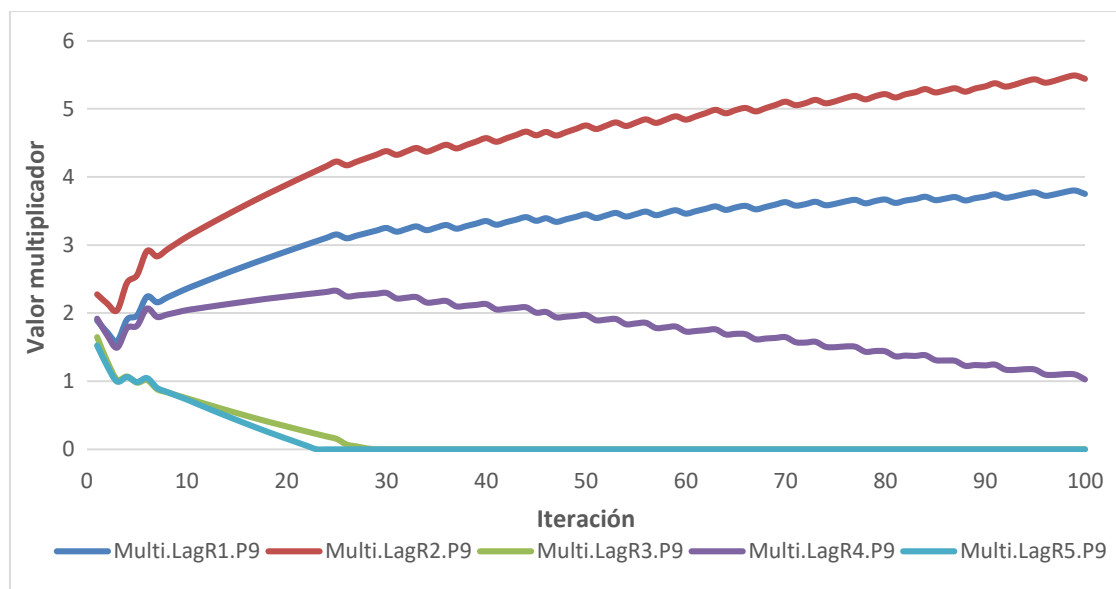
En la Figura 4-3 se pueden ver los valores de los multiplicadores de Lagrange de la primera instancia a lo largo de las cien iteraciones. La Figura 4-3 representa la evolución de los valores que toman los 50 multiplicadores de Lagrange de la primera instancia en cada iteración. Los 50 multiplicadores de Lagrange son de los 5 recursos relajados en los 10 periodos. Muchos de los multiplicadores toman valores nulos, dado que estas restricciones de capacidad no se sobrepasan. Por lo que no se necesita penalizar la función objetivo en dichos casos. Otros multiplicadores de Lagrange evolucionan hasta la convergencia a sus valores. Estos multiplicadores penalizan los requerimientos de los recursos más demandados, con el fin de no sobrepasar el uso de la capacidad de dichos recursos. En la Figura 4-4 y Figura 4-5 se pueden apreciar detalles de los multiplicadores de los recursos relajados en un periodo determinado. Los multiplicadores del periodo 9 de los 5 recursos se pueden ver en la Figura 4-4 y los multiplicadores del periodo 10 se pueden ver en la Figura 4-5. Los multiplicadores únicamente toman valores distintos a cero en los periodos 9 y 10. En el resto de periodos hay capacidad suficiente para satisfacer las demandas solicitadas.

Figura 4-3: Evolución de los multiplicadores de Lagrange con el método del subgradiente recogido por Fisher (2004) de la primera instancia en los diez periodos del modelo.



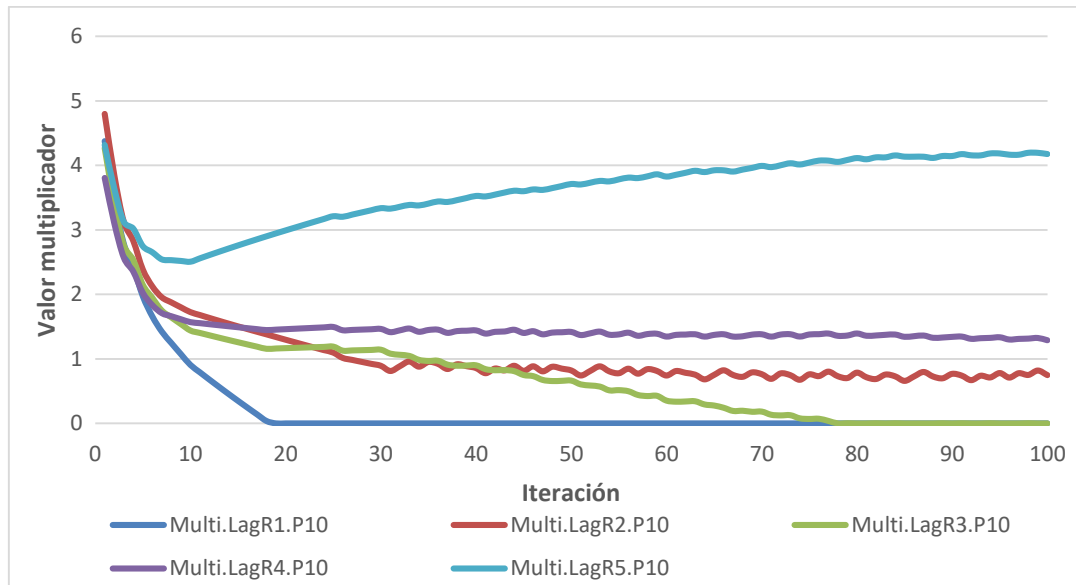
Cada línea representa los valores que toma cada multiplicador de Lagrange en cada iteración para los recursos relajados en todos los periodos del modelo. Fuente: Elaboración propia

Figura 4-4: Evolución de los multiplicadores de Lagrange con el método del subgradiente recogido por Fisher (2004) de la primera instancia en el periodo 9.



Cada línea representa los valores que toma cada multiplicador de Lagrange en cada iteración. Fuente: Elaboración propia

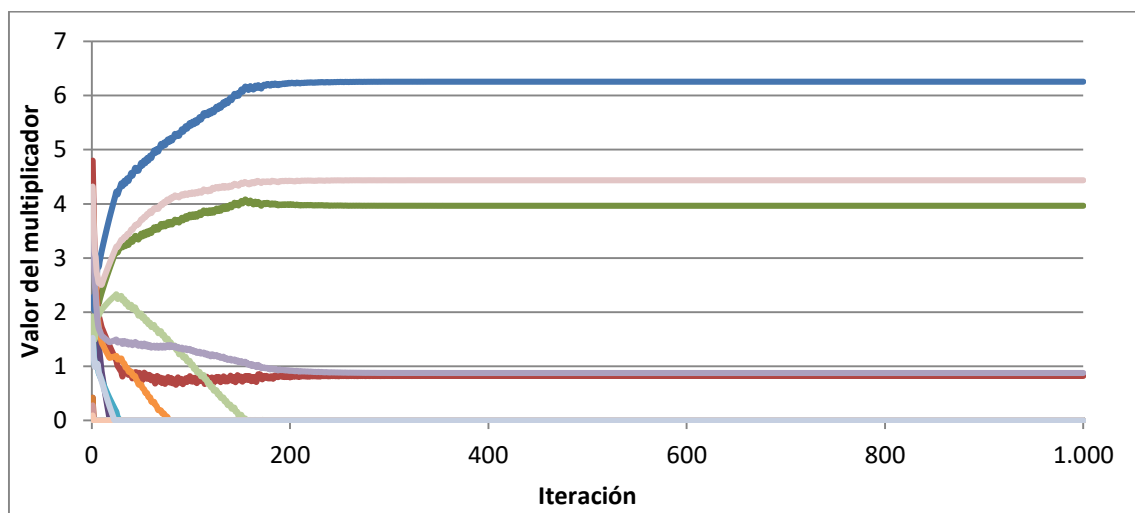
Figura 4-5: Evolución de los multiplicadores de Lagrange con el método del subgradiente recogido por Fisher (2004) de la primera instancia en el periodo 10.



Cada línea representa los valores que toma cada multiplicador de Lagrange en cada iteración. Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4-6 se reflejan nuevamente los multiplicadores de Lagrange de la primera instancia pero visualizando hasta las 1.000 iteraciones del índice j. En esta figura se puede apreciar como cada uno de los multiplicadores de Lagrange convergen en unos valores. Los multiplicadores de los recursos 1 y 2 en el periodo 9 y los multiplicadores de los recursos 3, 4 y 5 en el periodo 10 son los que tienen un valor estable distinto de cero después de las 1.000 iteraciones.

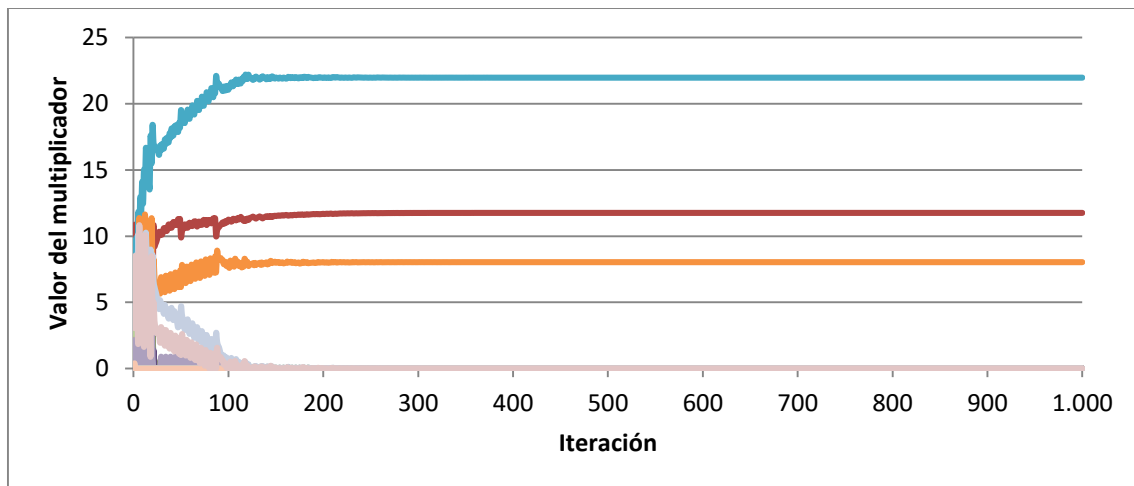
Figura 4-6: Evolución de los multiplicadores de Lagrange con el método del subgradiente recogido por Fisher (2004) de la primera instancia, con más iteraciones.



Cada línea representa los valores de cada uno de los 50 multiplicador de Lagrange de la Figura 4-3 pero en las 1.000 iteraciones de la primera instancia. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4-7 se representa la evolución de los valores de los multiplicadores de Lagrange en las 1.000 iteraciones realizadas de la octava instancia con el método recogido por Fisher (2004). De esta Figura 4-7, se pueden observar las oscilaciones iniciales en la actualización de los multiplicadores de Lagrange para luego converger tres de ellos a valores distintos de cero.

Figura 4-7: Evolución de los multiplicadores de Lagrange con el método del subgradiente recogido por Fisher (2004) de la octava instancia, con más iteraciones.

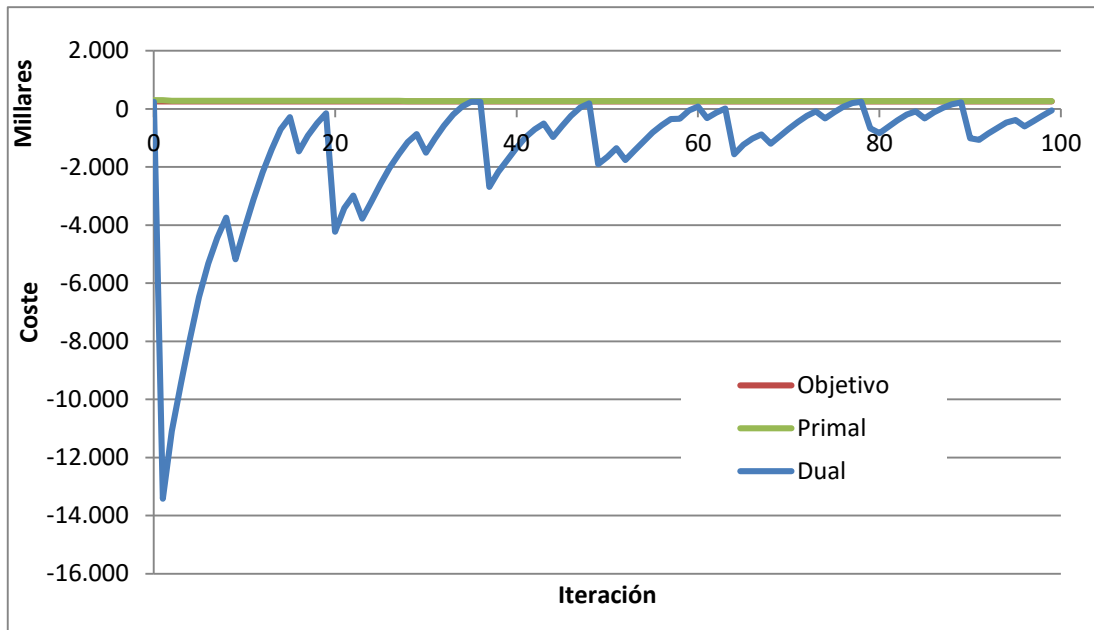


Cada línea representa los valores de cada uno de los multiplicador de Lagrange de la octava instancia, equivalente a lo observado en la Figura 4-3. Fuente: Elaboración propia

La Figura 4-8 muestra los valores que toma el objetivo del dual y primal de la formulación GMOP de la primera instancia con el método propuesto por Conejo et al. (2006). En la Figura 4-9 se ha reducido el rango del eje Y con el fin de poder apreciar los detalles tanto de los máximos de los resultados de la función dual, como los saltos en la función principal. En este caso, se puede apreciar las oscilaciones de la cota inferior y su mejor valor obtenido en la iteración 78. Además, la cota superior mejora incluso cuando el límite inferior no está mejorando. Con más iteraciones, las propuestas de soluciones de la función dual cumplen las restricciones relajadas. Hay un mayor número de mejoras en el límite superior que las que se aprecian al utilizar el método recogido por Fisher (2004) para esta instancia. Se aprecian más saltos en los valores que toman los objetivos de la función principal al aplicar el método propuesto por Conejo et al. (2006). Representaciones equivalentes se obtienen con la octava instancia que se pueden apreciar en la Figura 4-10 y la Figura 4-11.

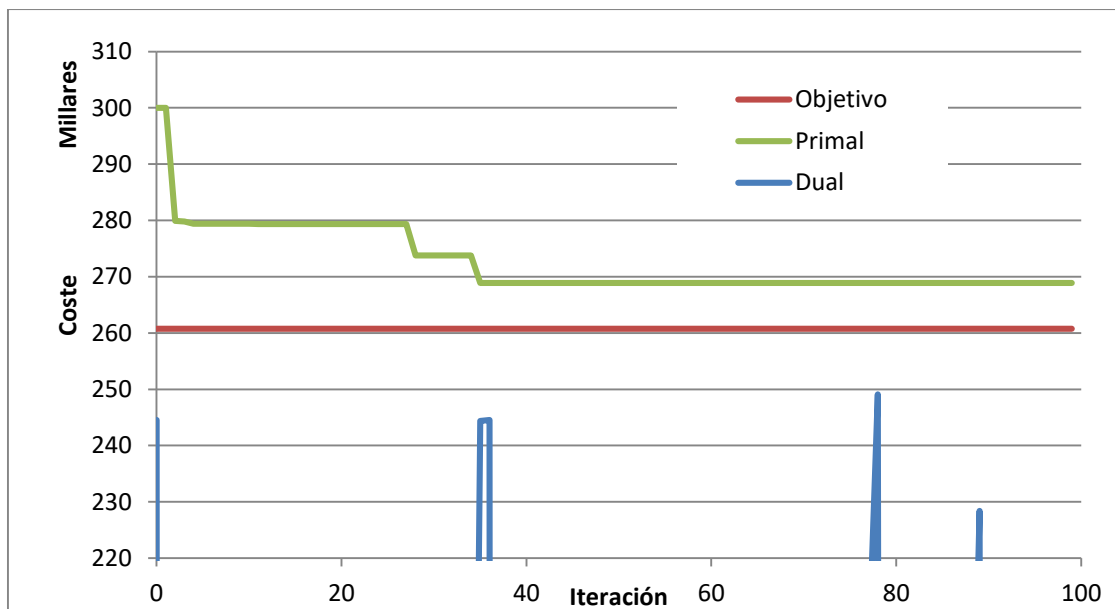
Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

Figura 4-8: Resultados del Dual y Primal del GMOP con el método del subgradiente propuesto por Conejo et al. (2006) de la primera instancia.



Objetivo valor de la función objetivo primal a partir de la propuesta óptima de Gurobi®, *Primal* valor de la función objetivo primal obtenida por la solución propuesta al problema dual que cumple las restricciones relajadas, *Dual* valor de la función objetivo dual obtenida en cada iteración. Fuente: Elaboración propia.

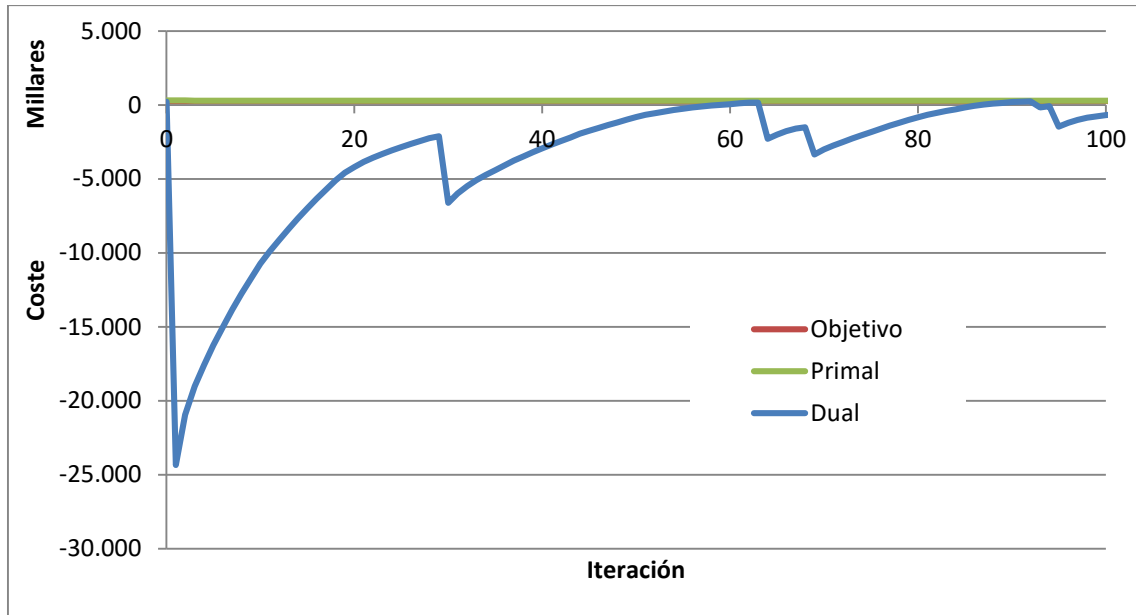
Figura 4-9: Detalle de los resultados del Dual y Primal del GMOP con el método del subgradiente propuesto por Conejo et al. (2006) de la primera instancia.



Objetivo valor de la función objetivo primal a partir de la propuesta óptima de Gurobi®, *Primal* valor de la función objetivo primal obtenida por la solución propuesta al problema dual que cumple las restricciones relajadas, *Dual* valor de la función objetivo dual obtenida en cada iteración. Fuente: Elaboración propia.

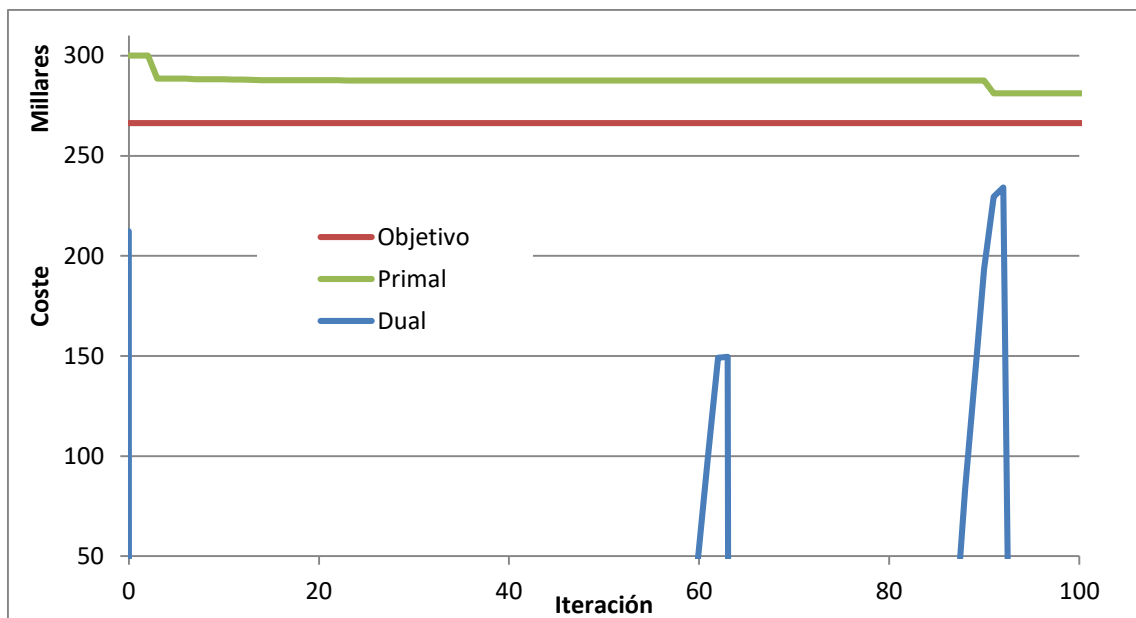
Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

Figura 4-10: Resultados del Dual y Primal del GMOP con el método del subgradiente propuesto por Conejo et al. (2006) de la octava instancia.



Objetivo valor de la función objetivo primal a partir de la propuesta óptima de Gurobi®, *Primal* valor de la función objetivo primal obtenida por la solución propuesta al problema dual que cumple las restricciones relajadas, *Dual* valor de la función objetivo dual obtenida en cada iteración. Fuente: Elaboración propia.

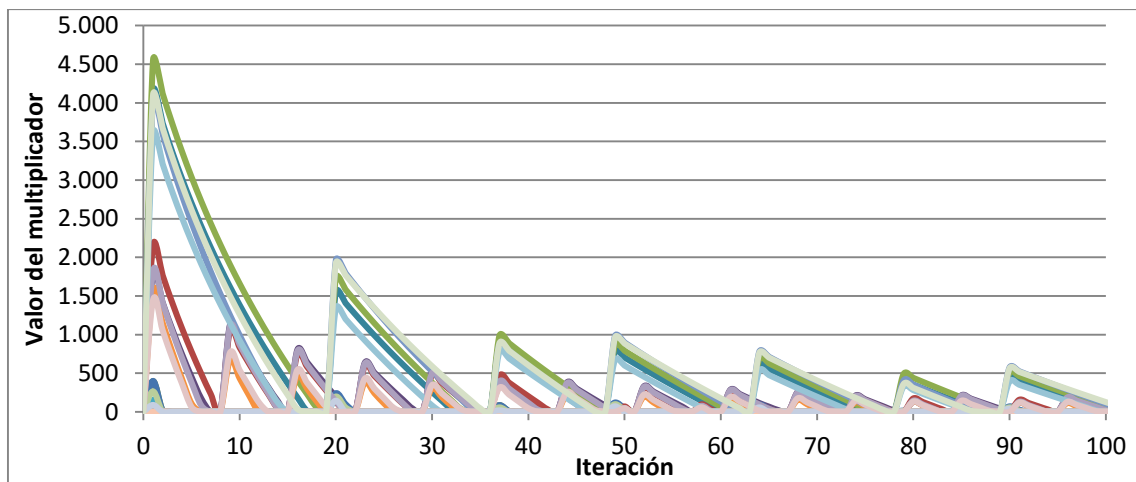
Figura 4-11: Detalle de los resultados del Dual y Primal del GMOP con el método del subgradiente propuesto por Conejo et al. (2006) de la octava instancia



Objetivo valor de la función objetivo primal a partir de la propuesta óptima de Gurobi®, *Primal* valor de la función objetivo primal obtenida por la solución propuesta al problema dual que cumple las restricciones relajadas, *Dual* valor de la función objetivo dual obtenida en cada iteración. Fuente: Elaboración propia.

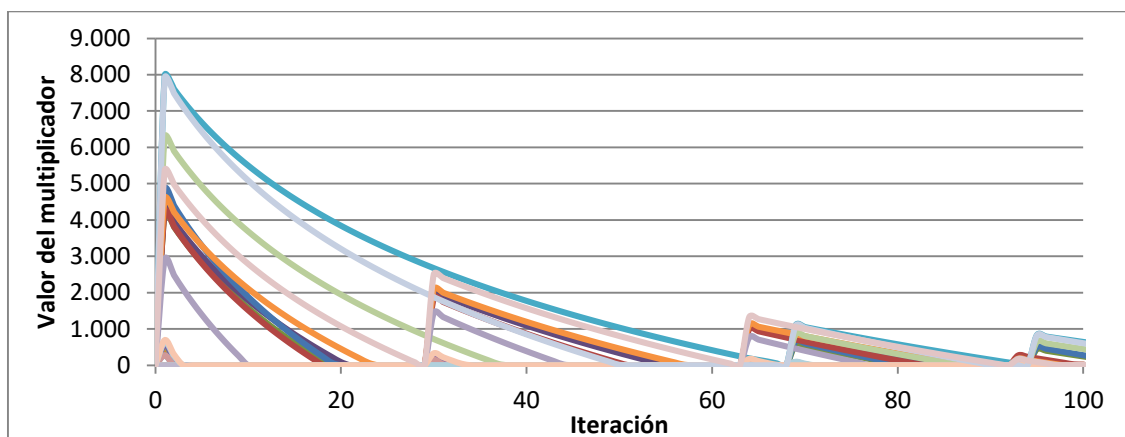
En la Figura 4-12 se pueden observar los valores que toman los multiplicadores de Lagrange con el método propuesto por Conejo et al. (2006) para la primera instancia en las cien primeras iteraciones. En ella se aprecia que los multiplicadores van oscilando sin llegar a una estabilidad en los valores, como si se ha apreciado en el método recogido por Fisher (2004) en la Figura 4-6. Una representación equivalente se obtiene en la octava instancia que se puede apreciar en la Figura 4-13. En la Figura 4-14 se pueden observar los valores que toman los multiplicadores cuando se amplían las iteraciones para la primera instancia. En ella se observan igualmente las oscilaciones sin llegar a una estabilidad en los valores, como si se ha observado en la Figura 4-6. En la Figura 4-15, se añade el detalle de las iteraciones 950 a 1.000, y en dicho detalle se aprecia que los multiplicadores de Lagrange siguen oscilando sin converger a unos valores determinados.

Figura 4-12: Evolución de los multiplicadores de Lagrange con el método del subgradiente propuesto por Conejo et al. (2006) de la primera instancia.



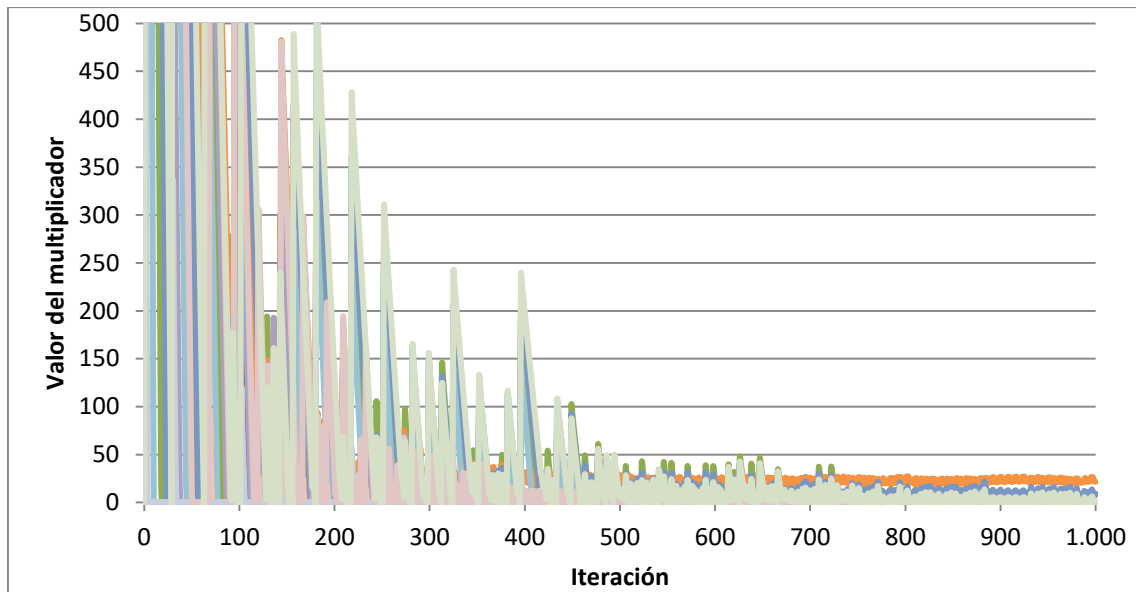
Cada línea representa los valores de cada multiplicador de Lagrange. Fuente: Elaboración propia

Figura 4-13: Evolución de los multiplicadores de Lagrange con el método del subgradiente propuesto por Conejo et al. (2006) de la octava instancia.



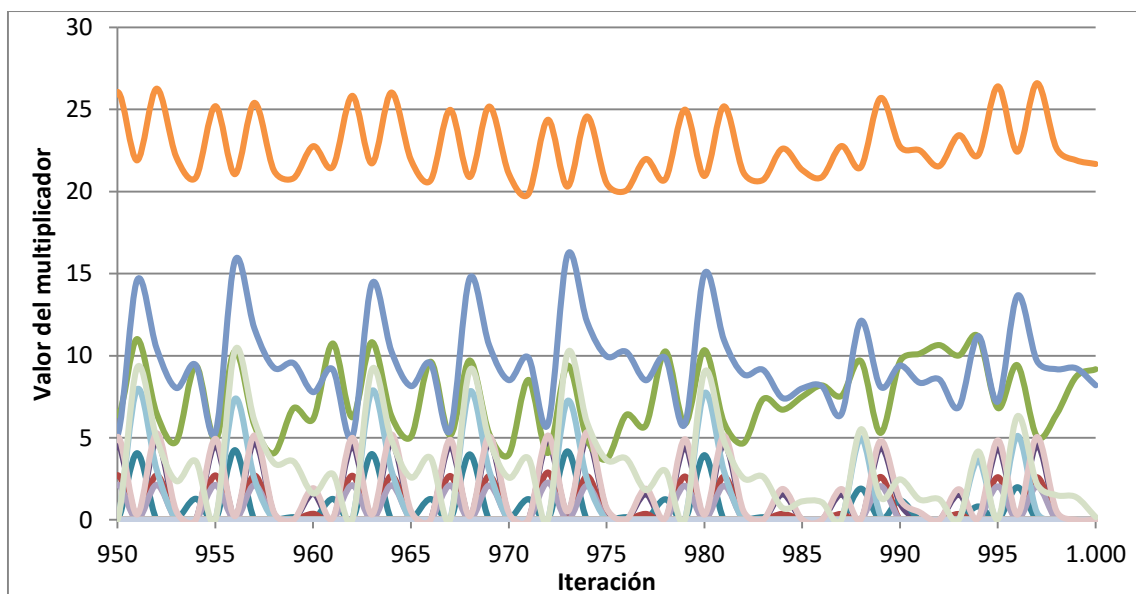
Cada línea representa los valores de cada multiplicador de Lagrange. Fuente: Elaboración propia

Figura 4-14: Evolución de los multiplicadores de Lagrange con el método del subgradiente propuesto por Conejo et al. (2006) de la octava instancia, con más iteraciones



Cada línea representa los valores de cada multiplicador de Lagrange. Fuente: Elaboración propia

Figura 4-15: Detalle de la evolución de los multiplicadores de Lagrange con el método del subgradiente propuesto por Conejo et al. (2006) de la octava instancia, con más iteraciones

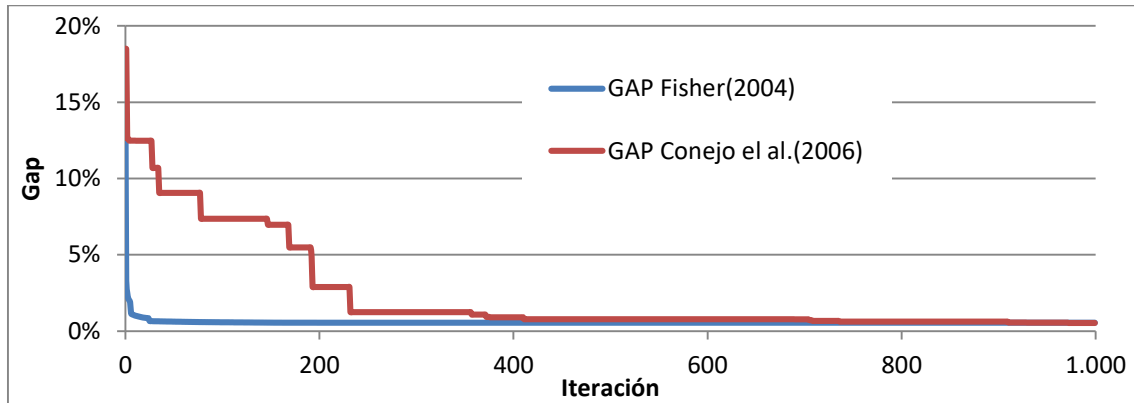


Cada línea representa los valores de cada multiplicador de Lagrange. Fuente: Elaboración propia

La Figura 4-16 muestra la evolución de los gaps obtenidos por los dos métodos a lo largo de las iteraciones para la primera instancia. En ella se aprecia la rápida reducción del gap obtenido con el método recogido por Fisher (2004) en las primeras iteraciones. Además, se aprecia como con el método propuesto por Conejo et al. (2006) requiere de más iteraciones para reducir a gaps equivalentes. El método propuesto por Conejo et al. (2006) llega a alcanzar un gap de dualidad

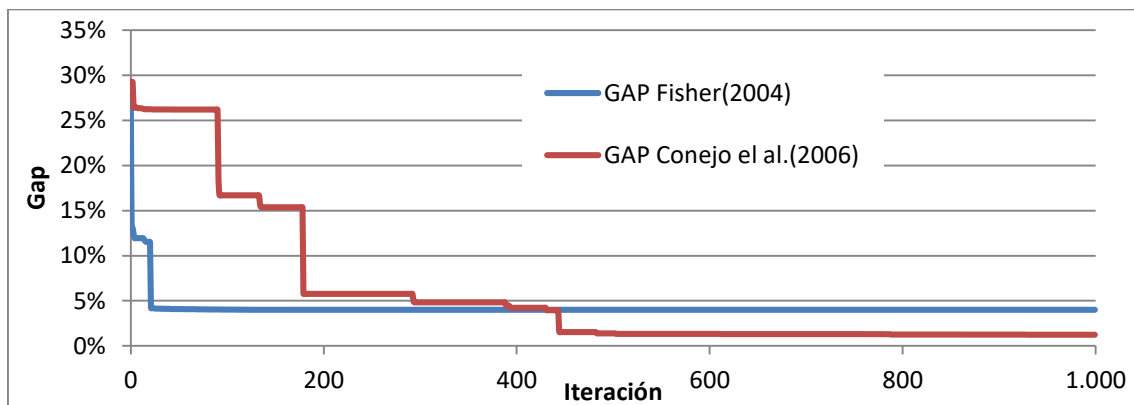
más bajo que el obtenido con el método recogido por Fisher (2004) después de muchas iteraciones. De la Tabla 4-4 se puede recoger que en la iteración 972 es cuando el método propuesto por Conejo et al. (2006) obtiene un gap inferior al obtenido por el método recogido por Fisher (2004) en la primera instancia. Representaciones equivalentes se obtienen en la instancia octava que se puede apreciar en la Figura 4-17 y como ninguno de los dos métodos consigue un gap inferior al 1% en las 1.000 iteraciones, recogido la Tabla 4-4.

Figura 4-16: Comparación de convergencia entre el método recogido por Fisher (2004) y el método propuesto por Conejo et al. (2006) de la primera instancia



Gap de dualidad con el método recogido por Fisher (2004), Gap de dualidad con el método propuesto por Conejo et al. (2006).
Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-17: Comparación de convergencia entre el método recogido por Fisher (2004) y el método propuesto por Conejo et al. (2006) de la octava instancia.



Gap de dualidad con el método recogido por Fisher (2004), Gap de dualidad con el método propuesto por Conejo et al. (2006).
Fuente: Elaboración propia.

4.6 Conclusiones y futuros trabajos

La principal contribución de este capítulo es presentar la metodología de aplicación de la relajación Lagrangiana para la formulación GMOP con el procedimiento del subgradiente y un análisis comparativo de dos propuestas para el recalcular del paso de actualización del multiplicador de Lagrange. Por un lado, se analiza el comportamiento del procedimiento de

actualización del subgradiente con el método recogido por Fisher (1985), ampliamente utilizado en la investigación científica, pero que no cumple los criterios de convergencia según presentaron Held et al. (1974). Por otro lado, se analiza la propuesta de Conejo et al. (2006), de variación constante del paso, que cumple los criterios de convergencia que presentaron Held et al. (1974).

El método recogido por Fisher (1985) ha mostrado, con los experimentos numéricos realizados, su rápida reducción del LGAP después de un número reducido de iteraciones en comparación al otro método utilizado. El método recogido por Fisher (1985) encuentra límites inferiores, por debajo del 1% en LGAP, en menos de 10 iteraciones en promedio. El método propuesto por Conejo et al. (2006) muestra una convergencia más lenta, pero puede mejorar al método recogido por Fisher (1985) después de muchas iteraciones. Por otro lado, el método propuesto por Conejo et al. (2006) muestra una mejor generación de soluciones válidas para la función principal, obteniendo en la mayoría de las instancias mejores resultados UGAP a partir de las 500 iteraciones que con el método recogido por Fisher (1985). Por el contrario, el método propuesto por Conejo et al. (2006) solo propone cotas inferiores, LGAP, cercanos a los generados con el método del subgradiente después de 1.000 iteraciones.

En conclusión, el método recogido por Fisher (1985) proporciona una convergencia más rápida de reducción del gap, generando en pocas iteraciones ajustadas cotas inferiores, en comparación al método propuesto por Conejo et al. (2006). Pero, dicho método presenta una carencia en la generación de soluciones válidas en el problema primal, que debe resolverse con otras heurísticas. Por otro lado, el método recogido por Fisher (1985), una vez estabilizado, es más lento en proponer mejoras tanto en el LGAP como en el UGAP, en las sucesivas iteraciones.

Por otro lado, se debe destacar que el método de actualización de los multiplicadores de Lagrange recogido por Fisher (1985) tiende a una convergencia en contraposición a las oscilaciones que presenta el método propuesto por Conejo et al. (2006), como se pueden observar en las Figura 4-3, Figura 4-6, Figura 4-7, Figura 4-12, Figura 4-13 y Figura 4-14. Por lo tanto, si se aplica el multiplicador de Lagrange como precio por el recurso compartido, el método recogido por Fisher (1985) tiende a unos precios estables para dichos recursos.

Como se ha comentado, otras restricciones podrían también relajarse, pero se reserva para futuras líneas de investigación confirmar si las conclusiones de Gupta y Maranas (1999) son aplicables a la relajación de la formulación GMOP.

Este capítulo se ha centrado en la relajación de Lagrange y su aplicación en la formulación GMOP. Se ha dejado para futuras investigaciones desarrollar otras descomposiciones como el método Dantzig-Wolfe (1960) o los cortes de Benders (1962) en la formulación GMOP.

La tesis se centra en la descomposición de Lagrange aplicada a la formulación GMOP como base para desarrollar la herramienta de coordinación distribuida que se presenta en el capítulo séptimo. Esta descomposición puede permitir una coordinación distribuida sin la necesidad de un agente coordinador, frente al método de Dantzig-Wolfe (1960) o de Benders (1962) que

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

requieren de una unidad mediadora con acceso a la información compartida y a las restricciones de conexión.

Por otro lado, en este capítulo se ha presentado la formulación GMOP aplicada a un banco de diez instancias para centrarse en analizar la relajación de Lagrange y los métodos de actualización de los multiplicadores. En el siguiente capítulo se profundizará en generar un banco de instancias suficientemente amplio para poder analizar las distintas opciones de la cadena de suministro en un futuro y extraer suficientes instancias para aplicar la propuesta de mecanismo de coordinación distribuido que se presenta en el capítulo séptimo.

Capítulo 5: Banco de instancias para la gestión de la cadena de suministro bajo horizontes rodantes, multiproducto, multinivel, multiproceso para el modelado de la planificación de operaciones capacitadas con *strokes*⁴

5.1 Introducción

En este capítulo se presenta un generador de instancias que permite observar el comportamiento de los modelos de programación matemática para la coordinación de las operaciones con el procedimiento de horizontes rodantes. Este banco de instancias debe ser lo suficientemente amplio tal que recoja las distintas situaciones que deben estudiarse, tanto para analizar su comportamiento individual, como su interacción entre las distintas situaciones.

En la literatura, se encuentran repertorios de instancias, tal como recoge Stadtler (2000), quien incorpora nuevas situaciones en su trabajo posterior (Stadtler, 2003). Específicamente preparados para la modelización con *strokes*, propuesto en capítulos anteriores, están los experimentos disponibles de Coronado-Hernández (2016). Esa propuesta de banco de instancias se va a completar, en este capítulo, con la inclusión de:

- Una estructura de producto con procesos alternativos.
- Una demanda estacional decreciente.
- Un factor del nivel de disponibilidad de la capacidad de los recursos.

El procedimiento denominado de horizontes rodantes es una herramienta habitual en la planificación de las operaciones en la industria y en los entornos académicos (Tiacci et al., 2012). Este procedimiento permite dar respuesta a problemas de gestión de inventarios, planificación de la producción, secuenciación, localización y un largo contenido de problemas (Chand et al., 2002). El uso del procedimiento de horizontes rodantes ayuda a tomar decisiones en entornos de incertidumbre y al mismo tiempo a descomponer grandes problemas en pequeños tramos en los que se planifica (Garcia-Sabater et al., 2009; Lv et al., 2017; Ramezani et al., 2017; Rodriguez et al., 2017; Zulkafli et al., 2017). Se debe tener en cuenta que las propuestas de planificación de las operaciones que se encuentren en el modelado de cada horizonte temporal de planificación no son necesariamente la misma propuesta de planificación de operaciones que se encontraría en la solución al modelado del problema que incluya todo el horizonte temporal

⁴ Una versión previa de este capítulo fue presentada en el *12th International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management* celebrado en Girona en 2018, recibiendo el reconocimiento como *Best Paper Award* en el área de Supply Chain Management and Logistics. Y ha servido para la realización de un artículo científico "Operations Planning test bed under rolling horizons, multi-product, multi-echelon, multi-process for capacitated production planning modelling with strokes", presentado en la revista "Central European Journal of Operations Research (CEJOR)".

(Cao, 2015). Este banco de instancias está diseñado para la aplicación del procedimiento de horizontes rodantes.

Además, con el fin de evitar ciertas simetrías en la estructura de costes en el eje temporal como entre los productos de cada instancia, se realiza una modificación en los costes. La simetría puede generar que equivalentes soluciones puedan ser intercambiadas (Bohlin et al., 2016), donde para el mismo valor objetivo se proponen soluciones diferentes (Zamarripa et al., 2016). Este hecho es importante en entornos de aplicación del procedimiento de horizontes rodantes. Los programas que intentan solucionar los modelos de programación matemática proponen soluciones, dentro del gap o tolerancia admitida o tiempo de cálculo, que pueden variar de un equipo de computación a otro. Estas diferentes soluciones pueden implicar grandes diferencias en los siguientes tramos en los que se planifica en el procedimiento de horizontes rodantes.

Sahin et al. (2013) destacan, en su revisión sobre horizontes rodantes, la necesidad de más estudios en entornos con demanda estocástica. Por ello, el repertorio de instancias recoge las situaciones de inestabilidad en la demanda, tanto por variaciones conocidas, variaciones posibles como por variaciones desconocidas, tal y como proponen Rafiei et al. (2012) respecto de las variaciones en la demanda.

En este capítulo, se presenta un generador de instancias junto con una base de datos de instancias. Se parte del trabajo de Coronado-Hernández (2016), completándolo con una nueva estructura de producto, tipología de demanda estacional decreciente y factor del nivel de capacidad de los recursos disponible. La estructura de costes es modificada con tal de evitar las simetrías que presentaba. Esta nueva base de datos de instancias se comparará con los resultados obtenidos en el trabajo de Coronado-Hernández (2016) en el siguiente capítulo, de acuerdo con los medibles propuestos. Las instancias están diseñadas para entornos con horizontes rodantes, con varios patrones de demanda, con incertidumbre en la demanda, multiproducto, multinivel, *multistroke* y con varias limitaciones de capacidad. Cada instancia incluye la información necesaria de costes de almacenaje, preparación de procesos, realización de procesos y penalización por retrasos.

El resto del capítulo está estructurado de la siguiente manera: En primer lugar, se presenta una breve introducción al procedimiento de horizontes rodantes; en segundo lugar, se describen los elementos comunes de la propuesta de generación de instancias; en tercer lugar, se introducen los elementos independientes en cada instancia; posteriormente, se presenta la estructura de los ficheros que contienen las instancias generadas. El capítulo finaliza con las conclusiones y propuestas de trabajos futuros.

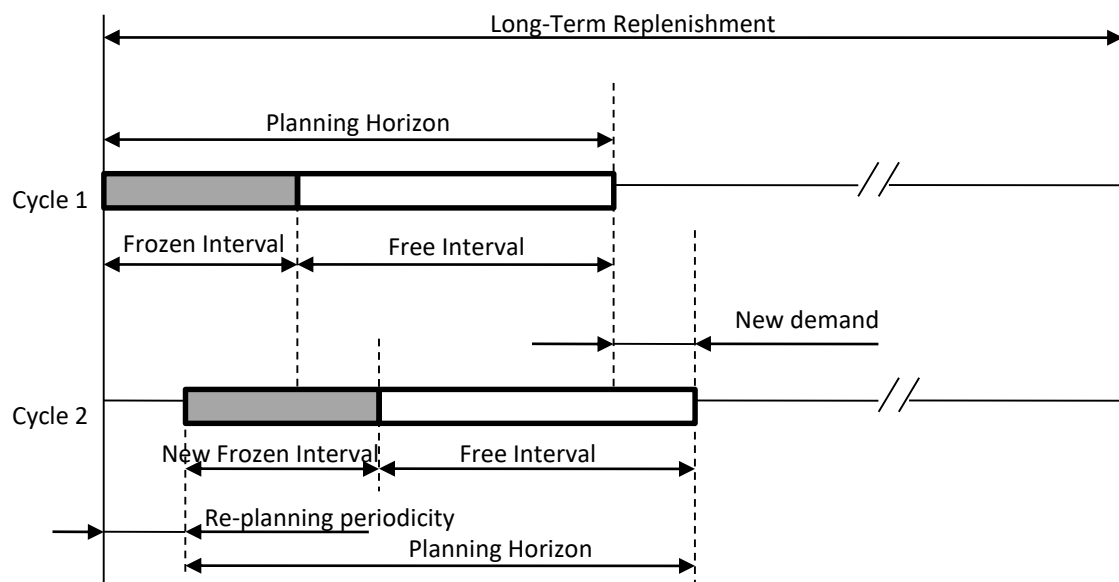
5.2 Procedimiento de horizontes rodantes, conceptos básicos y terminología

El procedimiento de horizontes rodantes simplifica los cálculos seleccionando solo la información de unos periodos iniciales y en el siguiente paso del procedimiento se incluye información de más periodos junto con los resultados del cálculo del paso previo.

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

Los primeros trabajos académicos explícitos sobre *Rolling Horizon* (RH) son de 1977 (Baker, 1977), según describe Cao (2015). Baker (1977) contribuyó que, en el cálculo con el procedimiento de horizontes rodantes, incluir más periodos de demanda en el horizonte de cada planificación no genera necesariamente un mejor resultado. De algún modo las propuestas de las operaciones planificadas para los periodos iniciales, aquellos que se ejecutan, contemplan únicamente los requerimientos de la demanda de los periodos cercanos. Ello es probablemente debido al equilibrio entre la capacidad disponible y los costes almacenaje. Por lo tanto, incluir más periodos en la demanda no necesariamente influye en la planificación de los periodos a ejecutar con la planificación. Baker (1977) concluyó que para perfiles de demanda constantes o de tendencia sin efectos estacionales, el *Planning Horizon* más apropiado debe ser superior a un múltiplo entero del tiempo derivado del EOQ (Economy Order Quantity). A continuación se pueden observar los elementos esenciales en los RH en la Figura 5-1.

Figura 5-1: Elementos del procedimiento de horizontes rodantes.



Fuente: Adaptado de Sahin et al. (2013).

El término *Long-Term Replenishment* (LT) hace referencia a la totalidad del horizonte de planificación que se desea analizar (Sahin et al., 2013). Dicho periodo es de duración tal que su modelado puede no ser asumible con la capacidad computacional disponible en el tiempo requerido a la toma de decisiones a realizar (Araujo et al., 2007) o incluye información futura de baja fiabilidad o con alta incertidumbre (Karimi et al., 2003) o ser muy grande e innecesario tomar decisiones que se volverán a tomar. Por lo que se selecciona una cantidad inferior de periodos para el cálculo de cada tramo.

La cantidad de periodos que se desea incluir en el cálculo de cada tramo, se le denomina *Planning Horizon* (PH). La extensión de dicho número de periodos es importante, ya que influye en los costes totales. Cuando más extenso es el PH, más bajos pueden ser los costes de la

planificación, pero puede haber más posibilidades de que haya inestabilidad en la planificación según proponen Sahin et al. (2013) y aumentan los requisitos de capacidad de cálculo.

Al incrementar los periodos de análisis en el PH, es posible evitar futuras rupturas de stock o retrasar decisiones de fabricación, logrando posibles reducciones de costes. Pero, dado que se está planificando periodos más lejanos en el momento de la toma de decisión, las demandas pueden estar sujetas a más incertidumbre y por lo tanto la reducción de costes es incierta. La planificación de las operaciones propuesta para los periodos distantes puede ser diferente de la planificación propuesta en los tramos en los que se planifica cercanos a esos periodos. Estos cambios de planificación para un periodo dado, entre los diferentes tramos en los que se planifica, genera nerviosismo debido a los cambios en la planificación.

En los casos de demanda estocástica, Wang (2009) recomienda extender el horizonte de cálculo. Pero Lalami et al. (2017) resaltan que su prolongación mejora el rendimiento cuando la demanda es determinista mientras que lo degrada cuando la demanda es incierta. Extender los periodos permite adecuar la planificación a futuras necesidades. Pero, por otro lado, si la demanda es incierta, se pueden tomar decisiones inadecuadas a la realidad que ocurrirá cuando se ejecuten dichos periodos. Xie et al. (2003) recomiendan extender el PH, dado que mejora los costes totales de planificación, la estabilidad y el nivel de servicio cuando hay limitación de capacidad, incertidumbre en la demanda y multiproducto. Nedaei & Mahlooji (2014) recogen que el horizonte de planificación debe ser de al menos 5 veces el ciclo de orden natural (EOQ).

Por otro lado, otros autores consideran que dada la incertidumbre en la previsión de la demanda y que la herramienta de los RH es una heurística, es recomendable que se seleccionen menos tramos de demanda en cada horizonte de planificación (PH), en favor de una mayor simplicidad y agilidad en los modelos (Araujo et al., 2007). Esta mayor simplicidad permite proponer acciones en tiempo real, como la propuesta de Hsu et al. (2017) sobre planificación de producción en una línea productiva de neumáticos.

La elección del PH conlleva que los modelos matemáticos interpretan, que pasados los tramos de demanda, ya no hay necesidad de stock ni de planificar sus operaciones. A este efecto se le denomina "*truncated horizon effect*" (Federgruen et al., 1994). Para disminuir dicho efecto, Stadtler (2000) propone ajustar los costes fijos de reposición en los periodos finales del PH. Fisher et al. (2001) agregan el requisito de un stock final. Maheut et al. (2011) proponen que ese nivel de stock final se obtenga resolviendo la planificación agregada, para mantener la consistencia entre planes intentando no desviarse de los resultados de la planificación de orden superior.

Narayanan et al. (2010) indican que hay otros elementos de decisión en RH que tienen impacto en los costes totales además del horizonte de planificación (PH), como el intervalo congelado. El intervalo de periodos en el que no se modificará la propuesta de planificación, independientemente de la posible nueva información que pueda aparecer, se denomina "Frozen interval" (FI). La planificación de estos periodos se utiliza en la industria para el cálculo de los

requerimientos de materiales, de modo que permite remitir pedidos en firme a la cadena de suministro (Sahin et al., 2013).

La definición del intervalo congelado es un equilibrio entre la estabilidad en la planificación, los costes totales y el nivel de servicio (Lalami et al., 2017). La congelación de la planificación puede referirse a la congelación de órdenes durante ciertos periodos o a la congelación de ciertas órdenes de planificación durante sus periodos de realización (Nedaei et al., 2014) que pueden durar distintos periodos. La congelación de órdenes durante ciertos periodos hace referencia a que las ordenes no se modifican, aunque nueva información sugiera cambiar las órdenes en esos periodos congelados. La congelación de ciertas órdenes de planificación durante sus periodos de ejecución se refiere a que ciertas ordenes no sean modificadas durante la totalidad de los periodos de realización de las operaciones de esas órdenes. Omar et al. (2009) recogen que los costes serán mayores si se utiliza el método basado en congelar las órdenes durante ciertos periodos que con el método de congelar órdenes durante sus periodos de ejecución en caso de largos intervalos congelados. Pero recomiendan implementar el método basado en congelar periodos porque es más fácil de implementar, ya que cada orden puede tener un tiempo de elaboración muy diferente.

El término “Re-planning periodicity” RP hace referencia a los periodos que hay entre tramos de planificación. En cada nuevo tramo se incorporará nueva información de la demanda, los pedidos, intervalos congelados y el estado de ejecución del anterior tramo de planificación. Habitualmente, en la industria, se vuelve a planificar semanalmente o incluso diariamente con el fin de incorporar nuevos pedidos (Rafiei et al., 2012) pese a que hay estudios académicos que indican que el mejor equilibrio entre costes y nivel de servicio debe estar en periodos superiores, en todo tipo de nivel de volatilidad en la demanda (Barrett et al., 1991). Sin embargo, hay investigación empírica que muestra que las empresas que reprograman con más frecuencia obtienen mejores resultados (Hozak et al., 2009). Este proceso de replanificación continuo permite anticipar las demandas futuras en las decisiones del periodo actual, al tiempo que pospone las necesidades futuras lo más tarde posible. Aunque una periodicidad de replanificación más corta puede generar más cambios en la planificación entre diferentes los tramos en los que se planifica. La magnitud de la inestabilidad se amplifica a medida que los requisitos de demanda de los productos se vuelven más volátiles. Xie et al. (2003) concluyen que el RP debe ser igual al FI para conseguir un mejor comportamiento, en multiproducto, capacitado y con incertidumbre en la demanda. Además, Omar et al. (2009) comentan que para las estructuras de costes afines entre costes unitarios y de preparación, con patrones de demanda poco volátiles, la frecuencia de replanificación no afecta tanto a los costes totales del sistema, como cuando los costes unitarios y los de preparación son muy diferenciados, donde los costes totales aumentan significativamente con el incremento de los periodos de replanificación.

Para finalizar, se observa que en la planificación de operaciones se suele buscar reducir los costes totales. Los costes incluidos en las funciones objetivo de la formulación son los asociados a las operaciones, los de la preparación de la operación, almacenaje, atraso y de compra, tal

como lo hace la formulación del *Generic Materials and Operations Planning* (GMOP) (García-Sabater et al., 2013). Otros modelos incluyen otros costes como los costes asociados a la realización de la previsión de la demanda, con el fin de que el propio modelado permita encontrar el equilibrio entre el adecuado horizonte de planificación y los costes asociados a la búsqueda de más periodos en la previsión de la demanda (Sethi et al., 1991), pero salen del alcance del trabajo.

5.3 Propuesta de generación de instancias: elementos comunes

En esta sección, se presentan los diferentes elementos comunes utilizados para la propuesta del generador del banco de instancias. Los experimentos se plantean para un horizonte total de planificación (LT) de 52 periodos, con un horizonte de planificación (PH) de 8 periodos, actualizados en cada periodo con un nuevo periodo de previsión de la demanda, periodo de replanificación (RP).

Dada la importancia que tienen los stocks iniciales (Behnamian et al., 2014), se añaden 12 periodos previos, con un stock inicial de 2 periodos de demanda en cada nivel de producto. Se han elegido 12 periodos previos con tal de que los stocks iniciales planteados en cada instancia no tengan repercusiones en los 52 periodos posteriores de análisis. En dichos 12 periodos, los stocks iniciales son utilizados para cubrir las demandas de los primeros periodos y hay suficientes periodos para que las propuestas de planificación de operaciones puedan ajustar los stocks antes de comenzar a contabilizar el primer periodo de los 52 periodos de estudio. Al mismo tiempo, para que el modelo de simulación perciba una continuidad y al final de la simulación no deje los stocks a 0, se añaden 7 periodos más en el último tramo de planificación. Los 7 periodos añadidos son para que el último periodo, de los 52 periodos de estudio, tenga un total de 8 periodos de demanda que cubrir, como han tenido todos los PH previos.

En resumen, para el análisis de 52 periodos, se aportan un total de 71 periodos de demanda, de los que habrá que ejecutar 64 tramos en los que se planifica.

La planificación buscará minimizar la suma de los costes de almacenar, realizar las operaciones, preparaciones de las operaciones y penalizaciones por retraso en las entregas. Los costes comunes a todas las instancias están afectados según sea la cercanía a la toma de decisión. El índice de periodos de planificación es identificado a lo largo de la tesis con la letra t . Pero, se identifica con $t'_{[1-8]}$ a esos mismos periodos cuando son observados desde ciertos periodos previos. Los costes son diferentes en función de la cercanía temporal al periodo de planificación de las operaciones. La dirección de la planificación de las operaciones tiene más opciones de encontrar alternativas si tiene un margen de varios periodos para reaccionar. Por ello, se plantea ponderar los costes entre los periodos según la cercanía a la toma de decisión y ponderar también los productos finales, tal y como plantean DeYong et al. (2016) como costes creciente y decrecientes. Los costes de almacenaje, retraso, preparación y realización del *stroke* se pueden ver en la Tabla 5-1, en unidades monetarias, y son modificados en función de la Tabla 5-2, en función de $t'_{[1-8]}$ y del $SKU[i]$ (Stock Keeping Unit). El coeficiente de unidades necesarias de subproducto para generar un producto es unitario en todos los casos.

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

Tabla 5-1: Costes y parámetros comunes en Unidad Monetaria.

Nivel	Costes de almacenaje (Hi)	Coste de preparación (Sck)	Coste del Stroke (COk)	Coste de los atrasos (CBi)
1	1	8.000	2	3.680
2	0,1	4.000	1	1.840
3	1	18.000	5	920
4	2	4.000	1	460
5	1	8.000	2	3.680

Fuente: Elaboración basada en trabajos previos (Prasad et al., 2001) modificados según los niveles definidos.

Tabla 5-2: Factores multiplicadores de los costes.

t ₁	t ₂	t ₃	t ₄	t ₅	t ₆	t ₇	t ₈
1,5	1,43	1,36	1,29	1,21	1,14	1,07	1

SKU ₁	SKU ₂	SKU ₃	SKU ₄	SKU ₅	SKU ₆	SKU ₇	SKU ₈	SKU ₉	SKU ₁₀
1,5	1,44	1,39	1,33	1,28	1,22	1,17	1,11	1,06	1

Fuente: Elaboración propia para reducir la simetría.

Cada instancia tiene 10 productos finales con demanda. Los productos finales requieren de 4 componentes. La demanda de los productos finales es la que determina los requerimientos de los componentes.

Cada proceso requiere consumir 1 unidad de tiempo (TOkr) por unidad procesada de producto, en UT (unidades de tiempo) por periodo del recurso utilizado que se puede observar en la Tabla 3. El tiempo de preparación (TSkr) consume entre 5-10 UT del recurso utilizado R1- R5, pero independiente de la secuencia de las operaciones, se puede apreciar en la Tabla 3. El tiempo de entrega (LTK) o necesario para realizar todas las operaciones es de un periodo en cada recurso que se puede observar en la Tabla 5-3.

Tabla 5-3: Parámetros de procesado.

Recursos	Tiempo requerido del recurso r por el stroke k (TOkr)	Tiempo de preparación (TSkr)	Lead time (LTk)
R1	1	5	1
R2	1	5	1
R3	1	5	1
R4	1	5	1
R5	1	10	1

Fuente: Elaboración basada en el trabajo de Coronado-Hernández (2016).

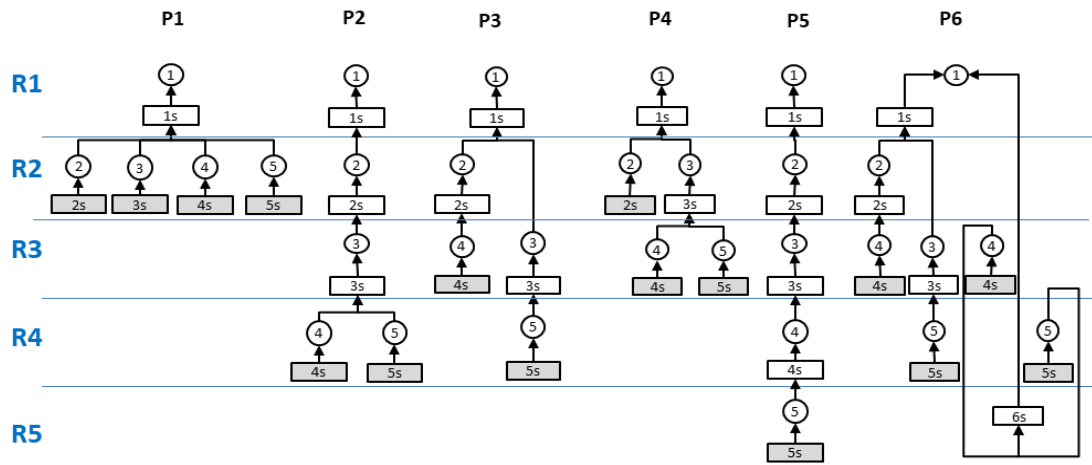
5.4 Propuesta de generación de instancias: elementos independientes

Las variables independientes introducidas en las distintas instancias del banco son agrupadas en internas a cada entidad y en elementos externos de cada entidad. Dentro de los elementos internos a cada entidad se definen las variables independientes de “complejidad del producto por la lista de materiales (BOM) y procesos” y la de “saturación de recursos”. En los elementos externos a cada entidad se incluyen las variables independientes de “tipo de demanda”, “distribución irregular de la demanda (Pareto)” e “incertidumbre en la demanda”. A continuación, son presentadas, con más detalle, cada una de estas variables independientes o factores del banco de instancia.

5.4.1 Factor de complejidad del producto por la lista de materiales (BOM) y procesos

El factor de complejidad del producto recoge los distintos componentes necesarios para definir el SKU del producto final, incluyendo su embalaje y su ubicación física. Se definen 6 tipos en el factor de complejidad de producto que se pueden observar en la Figura 5-2. Cada instancia tiene uno de los tipos del factor de complejidad de producto para sus 10 productos finales. Los 5 primeros tipos de estructuras (P1-P5) presentan una única composición posible para ensamblar sus productos finales. Cada una de estas instancias con estructura de producto (P1-P5) tiene 50 *strokes* u operaciones para realizar todos sus procesos. La sexta estructura (P6) tiene una estructura alternativa para un mismo producto final, por lo que sus instancias tienen 60 *strokes* u operaciones posibles.

Figura 5-2: Estructuras de los distintos tipos de productos.



Fuente: Elaboración basada en el trabajo previo de Coronado-Hernández (2016) y elaboración propia.

Estas estructuras de producto que se pueden apreciar en la Figura 5-2, están basadas en el trabajo previo de Coronado-Hernández (2016) al cual se le ha añadido la configuración P6, donde el producto final puede ser realizado por el *stroke* 1 o por el *stroke* 6. En la Figura 5-2 están representados los *strokes* con cuadrados y los SKUs con círculos. Los *strokes* de compras son los cuadrados sombreados que no consumen recursos propios. Los recursos propios disponibles son R1, R2, R3, R4 y R5, con capacidad limitada que es definida posteriormente. El factor cualitativo independiente del BOM puede tomar los valores de P1, P2, P3, P4, P5 y P6.

5.4.2 Factor de saturación de los recursos disponibles

Este factor identifica el nivel de capacidad disponible de los recursos. Dichos recursos permiten realizar los distintos tipos de *strokes* del modelo. Los *strokes* hacen referencia a las distintas operaciones del modelo, como aquellas de producción, compras o transporte (Maheut et al., 2011). La limitación de la capacidad disponible combinada con el horizonte de planificación (PH) y los periodos congelados (FI) elegidos tienen una importante influencia en la planificación de las operaciones y de los costes (Xie et al., 2003). En este factor, la capacidad disponible de todos los recursos se multiplica por los siguientes valores: 100%, 75%, 50%, 30%. La capacidad disponible para cada recurso en cada periodo (R1, R2, R3, R4, R5) toman los valores de 2.000 UT, 1.500 UT, 1.000 UT, 600 UT en cada nivel del factor. Por lo tanto, los niveles del factor cualitativo independiente de la saturación se identifican por R00, R75, R50 y R30 respectivamente.

5.4.3 Factor del tipo de demanda

Este factor identifica los patrones del comportamiento de la demanda a lo largo de los periodos. En este factor independiente se incluyen los patrones de la demanda como son los de demanda constante (CC), tendencia creciente (TT), estacionalidad (SS), estacionalidad más una tendencia creciente (ST) y estacionalidad más una tendencia decreciente (SD) que amplía las opciones presentadas en el trabajo de Coronado-Hernández (2016). Estos patrones se pueden observar

en la Tabla 5-4. Este factor es afín a otros trabajos previos (Carlson et al., 1982; Omar et al., 2009).

Tabla 5-4: Tipos de demandas.

Tipo de demanda		Función
CC	Constante	$D_t = \mu_t + Z_t$
TT	Tendencia creciente	$D_t = \mu_t + 50/100(t/52)\mu_t + Z_t$
SS	Estacionalidad	$D_t = \mu_t(1 + \sin(2\pi t/52 + \pi/2)) + Z_t$
ST	Estacionalidad con tendencia creciente	$D_t = \mu_t(1 + \sin(2\pi t/52 + \pi/2)) + 50/100(t/52)\mu_t + Z_t$
SD	Estacionalidad con tendencia decreciente	$D_t = \mu_t(1 + \sin(2\pi t/52 + \pi/2)) - 50/100(t/52)\mu_t + Z_t$

Fuente: Formulaciones basada en trabajos previos de (Carlson et al., 1982; Coronado-Hernández, 2016; Omar et al., 2009) y elaboración propia.

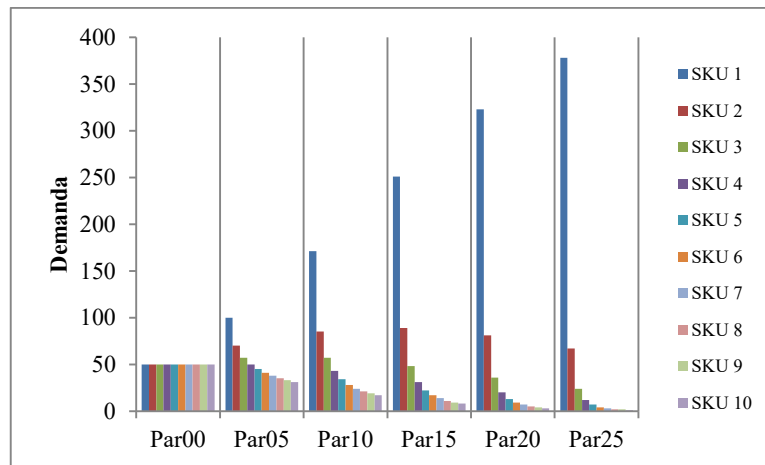
En la Tabla 5-4 μ_t es la demanda media de cada periodo t , fijada en 500 unidades. Z_t es el ruido calculado por una función aleatoria de tipo uniforme, de ± 5 unidades. La tendencia en la demanda es definida como la variación constante, periodo a periodo, con pendiente constante, llegando a una variación del 50% al final de 52 periodos. El factor cualitativo independiente del tipo de demanda podrá tomar los valores de CC, TT, SS, ST, SD en función del tipo de demanda seleccionada para los 10 productos finales en cada instancia.

5.4.4 Factor de distribución irregular de la demanda (Pareto)

Este factor refleja las diferencias en la demanda entre los 10 productos finales de cada instancia, para que los productos finales puedan tener diferentes niveles de demanda entre ellos. Mediante el uso de la ley de Zipf (Newman, 2004) definida en la Ecuación (5.1) se permite, en función de los valores que toma la variable α , realizar diferentes distribuciones de la demanda entre los productos finales. De esta manera, se puede plantear un ABC con respecto a la demanda entre los productos finales. En la Ecuación (5.1), la variable x representa a cada uno de los productos finales y D representa la demanda definida para el conjunto de productos finales de cada instancia. La variable α toma los valores de 0, 0.5, 1, 1.5, 2 y 2.5, que definen las alternativas de este factor. El factor cualitativo independiente de Pareto puede tomar los valores de Par00, Par05, Par10, Par15, Par20 y Par25. Se puede observar en la Figura 5-3 la influencia del valor que tome el factor α en las demandas de los diez productos finales .

$$d(x) = Dx^{-\alpha} \tag{5.1}$$

Figura 5-3: Representación del reparto de la demanda según la ley Zipf (Newman, 2004).



Fuente: Elaboración propia.

Para Par00 ($\alpha=00$) se puede observar que el reparto de la demanda es homogéneo entre las 10 SKUs de cada instancia. A medida que aumenta el valor de α , aumenta la diferencia entre la demanda de la SKU 1 y la demanda de la SKU 10.

5.4.5 Factor de incertidumbre en la demanda (CV)

La incertidumbre en la demanda es uno de los factores más importantes en la inestabilidad de la cadena de suministro (Lee et al., 1997). Para incluirla en los experimentos, se ha añadido una función de variación aleatoria normal centrada en la demanda de cada periodo. Esta variación aleatoria normal tendrá la desviación estándar de la demanda y un coeficiente de incertidumbre según la Ecuación (5.2). Esta propuesta se basa en la solución utilizada por Coronado-Hernández (2016) de aplicar una función aleatoria uniforme y la propuesta de Carlson, Beckman, & Kropp (1982) de un patrón de demanda normal y bimodal-normal. Se asume que la distribución normal está más cerca de la distribución de la incertidumbre en la demanda.

$$d_{t'}^{ro} = \text{Max}\left(0, D_{n-(n+8)}(1 + \text{Coef. Incert.} \times \text{Normal_Box_Muller}[0,1])\right); d_{t'}^{ro} \in \mathbb{Z}^+ \quad (5.2)$$

$$\text{Norma_Box_Muller}[0,1] = \sqrt{-2 \ln a_1} \sin(2\pi a_2); \quad (5.3)$$

$$a_1, a_2 \text{ are uniform random; } a_1, a_2 < 1; a_1, a_2 \geq 0$$

Para poder obtener una distribución aleatoria normal se utiliza la propuesta de Lee et al. (2006) que se presenta en las Ecuación (5.2) y (5.3). d_1^{ro} es la demanda del primer periodo del tramo en el que se planifica ro . $d_2^{ro} - d_8^{ro}$ son las previsiones de la demanda en los restantes 7 periodos en el tramo en el que se planifica ro . $D_{n-(n+8)}$ es la demanda según sea el tipo de demanda. "Coef.Incert." es el coeficiente de incertidumbre y puede tomar los siguientes valores (0, 10%, 20%, 30%, 40% y 50%). "Normal_Box_Muller[0,1]" aporta los números aleatorios normales centrados en 0 y de desviación estándar igual a uno definido en la Ecuación (5.3), donde a_1 y a_2

son 2 números aleatorios uniformes (Lee et al., 2006). El factor cualitativo independiente de incertidumbre en la demanda podrá tomar los valores de CV00, CV10, CV20, CV3, CV40 y CV50 en función del coeficiente de incertidumbre seleccionado.

5.5 Codificación de instancias

Se han creado 12⁵ instancias con cada una de las combinaciones posibles de los factores independientes. Las diferencias entre las 12 instancias radican en los valores de los parámetros aleatorios introducidos en el ruido de la demanda (dentro del factor del tipo de demanda) y en la incertidumbre (dentro del factor de incertidumbre en la demanda). El resumen de todas las instancias se puede observar en la Tabla 5-5. La codificación de las instancias recoge cada combinación empleada, sea por ejemplo “Par00_CC_CV00_P1_R00_9” que se interpreta como *Parxx* el tipo de distribución irregular de la demanda o Pareto, *CC* el tipo de demanda, *CVxx* el tipo de incertidumbre en la demanda, *Px* tipo de estructura de producto, *Rxx* nivel de saturación de los recursos y *9* el número de la instancia.

Tabla 5-5: Factores de las instancias.

Pareto	Demanda	Incertidumbre	BOM	Saturación	Instancia
Par00, Par05, Par10, Par15, Par20, Par25	CC, TT, SS, ST, SD	CV00, CV10, CV20, CV3, CV40, CV50	P1, P2, P3, P4, P5, P6	R00, R75, R50, R30	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12

Fuente: Elaboración propia.

5.6 Estructura de los ficheros del banco de instancias

Las instancias están creadas en ficheros de texto, con extensión *.csv*. Cada campo del fichero está separado por un punto y coma o por un salto de línea. En el anexo 2 se puede observar el contenido de uno de ellos. Las 51.840 instancias están disponibles en http://personales.upv.es/greriuso/TEST_BED_GMOP.rar

Las instancias presentan los datos según una estructura uniforme de:

- Descripción de los parámetros seleccionados de la Tabla 5-5 para esta instancia, se encuentran entre las líneas 1 a 6 de cada fichero. A continuación, se puede observar un ejemplo:

```
Pareto;Par00
Tipo_demanda;ST
Incertidumbre;CV10
BOM;P1
Saturacion;R00
```

⁵ Hair et al. (1999) recomiendan genéricamente entre nueve y quince instancias, ya que es más importante validar los resultados que aumentar el número de observaciones. Debido a que aún se desconoce la distribución de los medibles y su varianza que permitirían ajustar el número de muestras para un nivel de error tipo II dado, por lo que se selecciona una muestra de 12 instancias para cada combinación de factores.

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

Instancia;1

- Características y parámetros de cálculo propuestos para la instancia, se encuentran entre las líneas 7 a 16 de cada fichero. A continuación, se puede observar un ejemplo:

```
Productos_padre;10
Productos;50
Periodos;8
Rodantes;52
RodantesPrev;12
Recursos;5
Strokes;50
M;50000
Gap_Gurobi/100000b;1000
Lim_timp_Gurobi;3000
```

- Demanda prevista, D_n calculada para todos los periodos y productos finales, se encuentra entre las líneas 17 a 27 de cada fichero.

- Demandas para cada uno de los 10 productos finales en cada uno de los ocho periodos de cada tramo en el que se planifica, se encuentran entre las líneas 28 a 731 de cada fichero. El primer periodo es la demanda confirmada y el resto de periodos son las previsiones de la demanda.

- Stocks iniciales para cada producto de la instancia, se encuentran entre las líneas 732 a 733 de cada fichero.

- Costes de almacenamiento para cada producto y en cada uno de los ocho periodos de cada tramo en el que se planifica, se encuentran entre las líneas 734 a 742 de cada fichero.

- Costes de preparación de cada *stroke* en cada uno de los ocho periodos de cada tramo en el que se planifica, se encuentran entre las líneas 743 a 751 de cada fichero.

- Costes de cada *stroke* en cada uno de los ocho periodos de cada tramo en el que se planifica, se encuentran entre las líneas 752 a 760 de cada fichero.

- Capacidad disponible de cada uno de los recursos, se encuentra entre las líneas 761 a 762 de cada fichero.

- Tiempos de entrega o necesario para realizar cada operación, se encuentran entre las líneas 763 a 764 de cada fichero.

- Matriz de productos resultantes de cada una de las operaciones o *strokes*, se encuentra entre las líneas 765 a 815 de cada fichero.

- Matriz de productos consumidos por cada una de las operaciones o *strokes*, se encuentra entre las líneas 816 a 866 de cada fichero.

- Matriz de los recursos requeridos para la preparación de cada una de las operaciones o *strokes*, se encuentra entre las líneas 867 a 872 de cada fichero.

- Matriz de los recursos requeridos para la realización de cada una de las operaciones o *strokes*, se encuentra entre las líneas 873 a 878 de cada fichero.

- Matriz de los costes o penalizaciones por retraso de cada uno de los productos, en cada periodo, se encuentra entre líneas 879 a 887 de cada fichero.

5.7 Conclusiones y futuros trabajos

La planificación a través del procedimiento de horizontes rodantes es común en la industria (Sahin et al., 2013) y en la investigación académica, como una herramienta para resolver grandes problemas de programación matemática, de manera que los simplifique y los reduzca a tamaños asequibles a la capacidad computacionales disponibles. La disposición de un banco de instancias, facilita futuras investigaciones, dado que el comportamiento de esta heurística en situaciones estocásticas no está tan desarrollado como en situaciones deterministas (DeYong et al., 2016; Sahin et al., 2013).

El repertorio de instancias presentado en el capítulo permite investigaciones en modelos de programación matemática basados en *strokes*. Además, posibilita analizar el comportamiento de la heurística del procedimiento de horizontes rodantes con respecto a las 5 variables independientes introducidas y las variables de diseño del procedimiento de horizontes rodantes (PH, FI, RP, regla de tamaño de lote).

El banco de instancias posibilita observar cómo diferentes patrones de la demanda influyen en los costes de la planificación de operaciones, destacando aquellos que son más exigentes, como la tendencia estacional. Por otro lado, permite analizar cómo la combinación de factores influye en las propuestas de planificación, ya que el patrón de demanda estacional con tendencia decreciente puede verse influenciado de manera desigual por el factor de Pareto. Más aún, posibilita evaluar la incidencia de la complejidad del producto o las alternativas de operaciones en la re-planificación de las operaciones o en las preparaciones de las operaciones, con respecto a diferentes niveles de recursos disponible o incertidumbre en la demanda.

En este capítulo, se han seleccionado una serie de factores para generar el banco de instancias, se reserva para futuras líneas de investigación incorporar otros elementos y factores relevantes para la planificación de las operaciones. La demanda puede presentar cambios bruscos puntuales y saltos en la demanda que pudieran incluirse como factor de incertidumbre en la demanda.

En el siguiente capítulo se realiza una caracterización del banco de instancias propuesto en este capítulo y sus diferentes comportamientos con el fin de ayudar a analizar como los diferentes factores y sus combinaciones afectan a las variables de decisión. Posteriormente este banco de instancias permitirá seleccionar ciertas instancias para presentar la propuesta de mecanismo de coordinación distribuido.

Capítulo 6: Caracterización del banco de instancias y sus diferentes comportamientos

6.1 Introducción

En el capítulo anterior se ha presentado un amplio banco de instancias que representan diferentes configuraciones de la cadena de suministro. Dicho banco de instancias permite analizar el comportamiento de la propuesta de coordinación que se presenta en el siguiente capítulo. Esta propuesta de coordinación surge de la identificación del comportamiento de la relajación de Lagrange en la formulación GMOP identificado en el capítulo cuarto de la tesis.

En este capítulo se presenta el análisis del comportamiento de las propuestas de planificación para las instancias del banco presentado respecto de sus distintos factores. Los factores independientes se agrupan en externos e internos en el banco de instancia. Siendo los factores externos aquellos relativos a los distintos tipos de demanda, la incertidumbre en la demanda y la distribución irregular de la demanda entre los distintos productos de la empresa. Y los factores internos aquellos relativos a la complejidad del producto y la disponibilidad o saturación de los recursos necesarios para su realización. Para la modelización de las distintas instancias presentadas se utilizará el modelo GMOP contemplando posibles penalizaciones por incumplimientos o retrasos en la demanda solicitada, que se introduce a continuación.

El resto del capítulo está estructurado de la siguiente manera: En primer lugar, se presenta el modelo GMOP con retrasos; en segundo lugar, se describen los medibles recopilados sobre las propuestas de planificación; en tercer lugar, se introduce el análisis de la normalidad y los medios utilizados para la resolución de las instancias; posteriormente, se presentan los análisis de los comportamientos de las distribuciones de los costes totales, los nerviosismos tipo I, los nerviosismos tipo II y los niveles de servicio de las propuestas de planificación obtenidas. El capítulo finaliza con las conclusiones y propuestas de trabajos futuros.

6.2 Modelo GMOP con retrasos

En la capítulo cuarto se ha presentado el modelo GMOP (Garcia-Sabater et al., 2013) en una variante que no contempla atrasos en la satisfacción de los requerimientos. En este capítulo se presenta el modelo incluyendo la posibilidad de los retrasos, tal y como contemplan las instancias propuestas en el banco de instancias. La formulación del GMOP es una representación del problema del tamaño del lote, multinivel, multisubproceso y multipostproceso, multiestructura, multiperiodo, con capacidad limitada. La lista de índices, parámetros y variables del modelo se puede observar en la Tabla 6-1. La función a minimizar es el objetivo de incluir los costes de almacenar, las penalizaciones por retraso, el coste de preparación de los *strokes* y los costes de los *strokes* ejecutados, según se puede observar en la Ecuación (6.1) con las restricciones de las Ecuaciones (6.2) - (6.5).

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

Las restricciones que representan las Ecuaciones (6.2) son los de continuidad de inventario y conecta la parte logística (stocks, retrasos y demanda) con las operaciones (consumo de productos y creación de nuevos productos). Las restricciones de las Ecuaciones (6.3) definen las limitaciones de la capacidad de los recursos disponibles. Las restricciones de las Ecuaciones (6.4) establecen los requisitos de preparación de las operaciones cuando se realizan estas operaciones en el periodo t con el *stroke* k . Finalmente, el conjunto de restricciones de las Ecuaciones (6.5) establecen los dominios para las variables.

Tabla 6-1: Índices, parámetros y variables usadas in GMOP con retrasos.

Índices	
i	Índice de SKU (incluye producto, embalaje y ubicación)
t	Índice de periodos de planificación
r	Índice de recursos
k	Índice de <i>strokes</i>
Parámetros	
$D_{i,t}$	Demanda del SKU i para el periodo t
$H_{i,t}$	Coste de almacenar una unidad de SKU i en el periodo t
$CO_{k,t}$	Coste del <i>stroke</i> k en el periodo t
$CS_{k,t}$	Coste de preparación del <i>stroke</i> k en el periodo t
$CB_{i,t}$	Coste del retraso del SKU i en el periodo t
$SO_{i,k}$	Número de unidades del SKU i que genera el <i>stroke</i> k
$SI_{i,k}$	Número de unidades del SKU i que consume el <i>stroke</i> k
LT_k	Tiempo de espera del <i>stroke</i> k
$KAP_{r,t}$	Capacidad disponible del recurso r en el periodo t (en unidades de tiempo)
M	Número suficientemente grande
$TO_{k,r}$	Capacidad del recurso r requerida para realizar una unidad del <i>stroke</i> k (en unidades de tiempo)
$TS_{k,r}$	Capacidad del recurso r requerida para la preparación del <i>stroke</i> k (en unidades de tiempo)
Variables	
$z_{k,t}$	Cantidad de <i>strokes</i> k que se ejecutan en el periodo t
$\delta_{k,t}$	=1 si <i>stroke</i> k se realiza en el periodo t (0 en caso contrario)
$f_{i,t}$	Cantidad de SKU i en retraso en el periodo t
$x_{k,t}$	Nivel de inventario del SKU i disponible al final del periodo t

Fuente: Elaboración propia basado en Garcia-Sabater et al. (2013).

$$\min \sum_t \sum_i (H_{i,t} x_{i,t}) + \sum_t \sum_k (CS_{k,t} \delta_{k,t} + CO_{k,t} z_{k,t}) + \sum_t \sum_i (CB_{i,t} f_{i,t}) \quad (6.1)$$

$$x_{i,t} = x_{i,t-1} - D_{i,t} + f_{i,t} - f_{i,t-1} - \sum_k (SI_{i,k} z_{k,t}) + \sum_k (SO_{i,k} z_{k,t-LT_k}), \forall i, t \quad (6.2)$$

$$\sum_k (TS_{k,r} \delta_{k,t}) + \sum_k (TO_{k,r} z_{k,t}) \leq KAP_r \quad \forall r, t \quad (6.3)$$

$$z_{k,t} - M * \delta_{k,t} \leq 0, \forall k, t \quad (6.4)$$

$$x_{i,t} \geq 0; w_{i,t} \geq 0, \forall i, t; z_{k,t} \in \mathbb{Z}^+; \delta_{k,t} \in \{0,1\} \quad \forall k, t \quad (6.5)$$

6.3 Propuesta de medibles sobre las propuestas de planificación de operaciones obtenidas a partir del banco de instancias

En esta sección, se recopilan diferentes medibles que permiten comparar las propuestas de planificación de las operaciones que se pueden obtener para cada una de las instancias de la base de datos presentada. En el modelo de la planificación de operaciones, el objetivo es reducir los costes totales a partir de unas variables de decisión. En cada periodo de decisión, se realiza una nueva propuesta de planificación que actualiza la propuesta previa. Estos planes definen las operaciones a realizar en cada periodo para satisfacer el objetivo establecido en el modelo. Los medibles propuestos a continuación permiten comparar las distintas propuestas de planificación que se obtendrán en relación a las variables independientes planteadas en la base de instancias en función de los costes, cambios de planificación o cumplimiento de la demanda.

Los medibles propuestos se han establecido a partir de los trabajos de Coronado-Hernández (2016) y de Omar et al. (2009). Se propone recoger los costes generados por las propuestas de planificación, la inestabilidad en la planificación entre los diferentes tramos en los que se planifica y el nivel de servicio respecto del cumplimiento de la demanda solicitada. Además, se añaden otros medibles del proceso llevado a cabo por el software de optimización utilizados. El termino inestabilidad en la planificación hace referencia a los cambios en la planificación en cada tramo en el que se planifica para cada periodo. La inestabilidad recoge tanto el criterio de si la operación se ejecuta o no, como de las cantidades ejecutadas.

La propuesta de medibles es la siguiente:

1. Respecto de los costes generados por la propuesta de planificación se propone:
 - Recoger los costes totales de las propuestas de planificación de los periodos en análisis, 52 periodos en estas instancias. Los costes totales hacen referencia a los distintos costes recogidos en la función objetivo propuesta por el modelo. Las instancias permiten incluir los costes de las operaciones planificadas, de las preparaciones de las operaciones, del almacenaje y de las penalizaciones por retrasos en el cumplimiento de la demanda en la función objetivo.
 - Obtener el ratio de variación de los costes totales respecto de un patrón, propuesta de planificación base, definido en la Ecuación (6.6), tal y como la recoge Simpson (2001).

$$\frac{TCR_1 - TCR_B}{TCR_B} \quad (6.6)$$

2. Respecto de la inestabilidad en la planificación o también llamado nerviosismo generado por las propuestas de planificación, se proponen los siguientes medibles basándose en el trabajo de Narayanan et al. (2010):
 - Nerviosismo tipo I, hace referencia a la medición de la inestabilidad provocada por los cambios en el tiempo de las preparaciones de lote. El medible propuesto se puede observar en la Ecuación (6.7). La ecuación refleja el número de ocasiones en que una preparación de lote planificada en un periodo de decisión anterior se

ejecuta o no en el periodo previsto con respecto al número total de preparaciones de lote realizadas en los 52 periodos de análisis. t' es igual a 1 en los periodos en que se ejecutan las preparaciones de los lotes. $\delta_{k,ro,t}$ es igual a 1, si el *stroke* k se realiza en el tramo en el que se planifica ro , en el periodo t y 0 en caso contrario.

$$ISR_1 = \frac{\sum_{k,ro,t} \|\delta_{k,ro,t} - \delta_{k,ro-1,t+1}\|}{\sum_{k,ro} \delta_{k,ro,t'=1}} \quad (6.7)$$

- Nerviosismo Tipo II, hace referencia a la medición de la inestabilidad provocada por los cambios en el tiempo del número de unidades de *strokes* planificadas, como un cociente respecto del número total de unidades en toda la planificación que se ejecutan en la simulación de los 52 periodos de análisis, definido en la Ecuación (6.8). $z_{k,ro,t}$ es la cantidad de *strokes* k planificada para ejecutarse en el tramo en el que se planifica ro y en el periodo t .

$$ISR_2 = \frac{\sum_{k,ro,t} \|z_{k,ro,t} - z_{k,ro-1,t+1}\|}{\sum_{k,ro} z_{k,ro,t'=1}} \quad (6.8)$$

3. Respecto del nivel de satisfacción de la demanda, se propone medir el nivel de demanda insatisfecha de acuerdo con la demanda solicitada en los 52 periodos de análisis. En las instancias de este banco solo los productos finales tienen demanda. El medible propuesto se recoge en la Ecuación (6.9). Este medible se basa en las propuestas de Yildirim et al. (2005) para medir el nivel de servicio. El termino $f_{i,ro,t}$ es la cantidad de demanda insatisfecha del producto i en el tramo en el que se planifica ro y en el periodo t . Y el termino $d_{i,ro,t}$ es la demanda del producto i en el tramo en el que se planifica ro y en el periodo t .

$$NSR = \frac{\sum_{ro} \left(1 - \frac{\sum_i f_{i,ro,t'=1}}{\sum_i d_{i,ro,t'=1}}\right)}{52} \quad (6.9)$$

4. Con respecto a los medibles en el proceso llevado a cabo por el software de optimización del modelado, se propone recopilar el tiempo de ejecución del programa informático en proponer una solución. Este tiempo es aportado por el propio programa optimizador e incluye tiempos de cálculo como los tiempos de lectura y escritura de los datos. Este tiempo depende de variables no controladas como la temperatura del servidor, saturación del servidor, memoria disponible, fragmentación de la memoria y otros elementos, pero proporciona un cierto rango de magnitud.

6.4 Resolución de las instancias y análisis de normalidad

Para la búsqueda de la mejor solución a las 51.840 instancias del banco presentado en el capítulo anterior según el modelo descrito, se ejecuta el programa comercial GUROBI® en el Rigel clúster, un clúster basado en la arquitectura grid y un PC multinúcleo de la Universitat Politècnica de València, que incluye 72 nodos Fujitsu BX920S3 instalados en el chasis BX900S2. Cada nodo incluye 2 procesadores Intel Xeon E5-2450 (8 núcleos / 16 hilos, 2.1-2.5 GHz) y 64 GB de RAM DDR3. Los nodos están unidos por 2 interfaces Ethernet de 10 GB. El clúster ejecuta un sistema

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

operativo CentOS 6 y Sun Grid Engine administra su carga. El PC multinúcleo ejecuta un sistema operativo CentOS 6.4 en un procesador Intel Core i5-4670 (4 núcleos / 4 hilos, 3.4 GHz), con 8 GB de RAM DDR3 (ASIC, 2018) con el programa de búsqueda de la solución exacta GUROBI® 7.0.2 64bits para Linux.

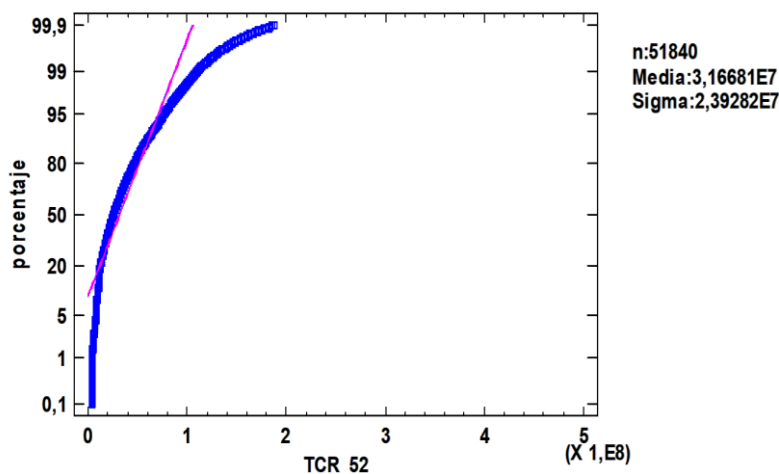
Las instancias se resolvieron con las especificaciones de gap admisible inferior al 1% (GRB.DoubleParam.MIPGap=0,01). Los cálculos para cada instancia son realizados en un solo núcleo (GRB.IntParam.Threads=1). El límite de cálculo de cada tramo en el que se planifica es de 3.000 segundos (GRB.DoubleParam.TimeLimit=3.000).

De las propuestas de planificación obtenidas para las instancias, se recopilan, para los 52 tramos en los que se planifica de estudio, el coste total de los periodos ejecutados, el nerviosísimo tanto de tipo I (Ecuación 6.7), como de tipo II (Ecuación 6.8) y el nivel de servicio (Ecuación 6.9). El tiempo de ejecución no se ha considerado relevante para este análisis, ya que depende de factores que no se pudieron controlar (temperatura del servidor, saturación servidor, etcétera) aunque se haya recopilado. Los valores obtenidos se pueden observar en el fichero disponible en: <http://personales.upv.es/greriuso/Resumen de propuesta de solución.xlsx>

Los resultados obtenidos son comparados con los resultados presentados en los trabajos de Coronado-Hernández (2016) y los de Omar et al. (2009). En ambos trabajos se han realizado pruebas de métodos paramétricos sobre los resultados obtenidos, como herramienta para describir el comportamiento de las variables independientes. En dichos trabajos se han realizado análisis de la varianza (ANOVA). Esta prueba de método paramétrico se basa en el supuesto de que las muestras son aleatorias y se seleccionan de una población normal (Walpole et al., 1999), por lo que la muestra también debe presentar una distribución normal.

Los resultados de la resolución de las 51.840 instancias propuestas no presentan una distribución normal en los 4 medibles recogidos. La distribución de los costes totales de los periodos ejecutados (TCR_52) se pueden ver en la Figura 6-1 y la Tabla 6-2, donde tanto el sesgo estandarizado como la curtosis estandarizada están fuera del rango -2 a +2 esperado de una distribución normal como es indicado por el programa estadístico Statgraphics Centurion XVII©.

Figura 6-1: Gráfico de probabilidad normal de los costes totales



TCR_52 costes totales en los 52 periodos de análisis. Fuente: Elaboración propia con el programa Statgraphics Centurion XVII©.

Tabla 6-2: Resumen estadístico de las mediciones sobre los costes totales

Recuento	51840
Promedio	3,16681E7
Mediana	2,55957E7
Desviación Estándar	2,39282E7
Coefficiente de Variación	75,5595%
Mínimo	3,50143E6
Máximo	4,25928E8
Rango	4,22427E8
Sesgo Estandarizado	-389,152
Curtosis Estandarizada	767,461

Fuente: Elaboración propia con el programa Statgraphics Centurion XVII©.

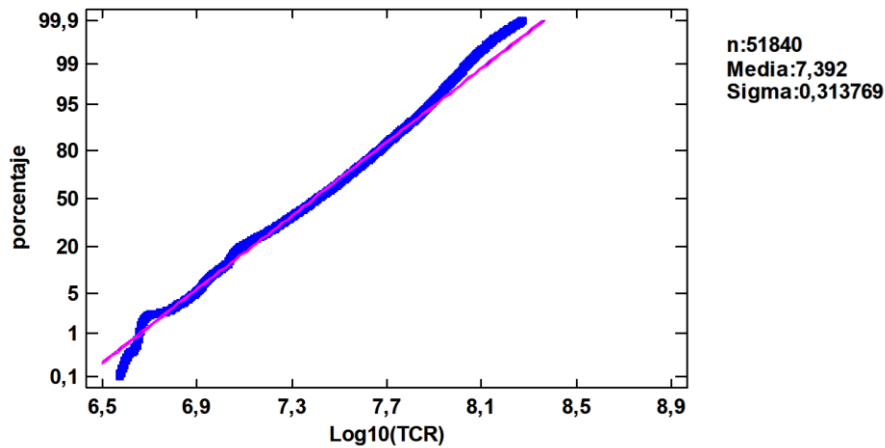
Aplicando la transformación logarítmica en base 10 a los costes totales con el fin de acercarse a una distribución normal, se mejoran los resultados de sesgo estandarizado y curtosis estandarizada, pero sin lograr una distribución normal como se puede apreciar en la Tabla 6-3 y en la Figura 6-2. También se han probado otras transformaciones $1/x$ o \sqrt{x} o $\ln(x+1)$ y eliminado outliers de los resultados, pero sin lograr un sesgo estandarizado y una curtosis estandarizada dentro del rango de -2 a +2, esperado para una distribución normal.

Tabla 6-3: Resumen estadístico $\text{Log}_{10}(\text{TCR}_{52})$

Recuento	51840
Promedio	7,392
Mediana	7,40817
Desviación Estándar	0,313769
Coefficiente de Variación	4,24472%
Mínimo	6,54425
Máximo	8,62934
Rango	2,08509
Sesgo Estandarizado	18,3974
Curtosis Estandarizada	-19,1428

Fuente: Elaboración propia con el programa Statgraphics Centurion XVII.

Figura 6-2: Gráfico de probabilidad normal Log10(TCR_52)



Fuente: Elaboración propia con el programa Statgraphics Centurion XVII.

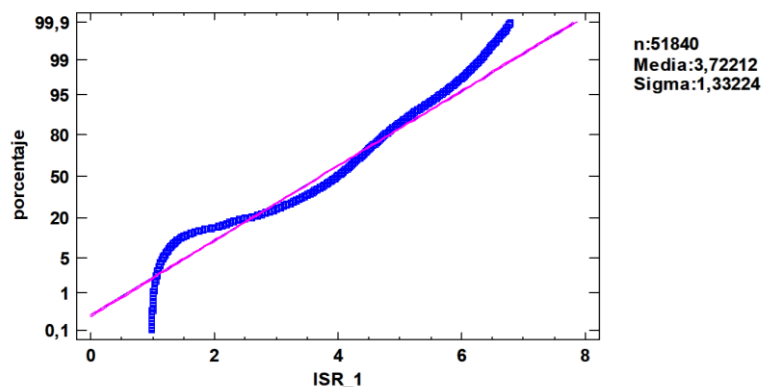
Equivalentes resultados presentan la distribución del nerviosísimo tanto de tipo I (Ecuación 6.7) (*ISR1*), como de tipo II (Ecuación 6.8)(*ISR2*) y el nivel de servicio (Ecuación 6.9)(*NSR*) que se pueden apreciar en la Tabla 6-4 y Figura 6-3, Figura 6-4 y Figura 6-5.

Tabla 6-4: Resumen estadístico ISR1, ISR2, NSR

	ISR1	ISR2	NSR
Recuento	51840	51840	51840
Promedio	3,72212	3,13005	0,946738
Mediana	3,99592	3,3193	0,957885
Desviación Estándar	1,33224	0,966161	0,0486918
Coeficiente de Variación	35,79%	30,87%	5,14%
Mínimo	0,97541	0,922183	0,704043
Máximo	7,88596	8,52369	1
Rango	6,91055	7,60151	0,295957
Sesgo Estandarizado	72,9702	91,5066	224,164
Curtosis Estandarizada	-21,5483	-10,8556	96,6549

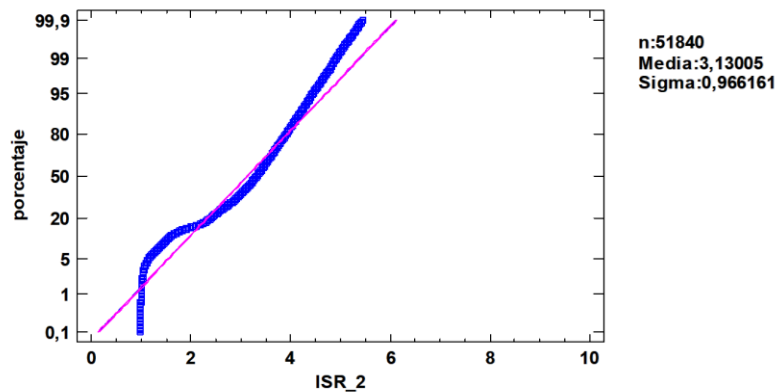
Fuente: Elaboración propia con el programa Statgraphics Centurion XVII.

Figura 6-3: Gráfico de probabilidad normal ISR1



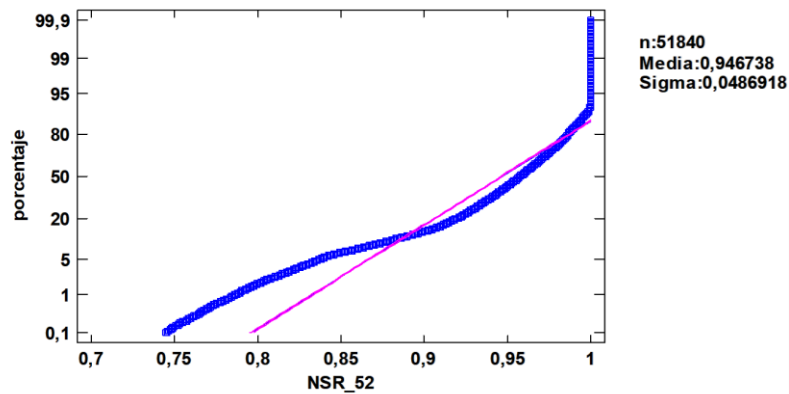
Fuente: Elaboración propia con el programa Statgraphics Centurion XVII.

Figura 6-4: Gráfico de probabilidad normal ISR2



Fuente: Elaboración propia con el programa Statgraphics Centurion XVII.

Figura 6-5: Gráfico de probabilidad normal NSR



Fuente: Elaboración propia con el programa Statgraphics Centurion XVII.

Dado que los requisitos de los métodos paramétricos no se cumplen, se utilizarán métodos no paramétricos o métodos de distribución libre. En los métodos no paramétricos, el conocimiento de la distribución de la población no se asume (Walpole et al., 1999). Las pruebas de métodos no paramétricos no requieren de supuestos, excepto suponer de una forma razonable que la distribución de su población es continua (Pérez-López, 1998). Se pueden identificar estas distribuciones continuas al observar las Figura 6-1, Figura 6-3, Figura 6-4 y Figura 6-5. La comparación de las medianas se realiza, como una prueba de método no paramétrico, para poder identificar la tendencia central de cada nivel u opciones en los distintos factores independientes, en los 4 medibles definidos. Se selecciona el análisis de las medianas, ya que no es recomendable analizar las medias cuando no se identifica la distribución de la que proviene la muestra (Pérez-López, 1998).

La prueba de método no paramétrico de medianas, de Mood, es realizada con el programa Statgraphics Centurion XVII®. Esta prueba permite el análisis de los efectos causados por cada factor y evalúa la hipótesis nula de que las medianas de los distintos niveles u opciones de cada

factor son iguales. Esta prueba se realiza contando el número de observaciones en cada muestra, a cada lado de la mediana global y que el valor-P de la prueba de chi-cuadrada es menor que 0,05. Por lo tanto, las medianas de los niveles u opciones de cada factor son significativamente diferentes con un nivel de confianza del 95%. También se incluyen los intervalos del 95% de confianza para las medianas, basados en los estadísticos de orden de cada factor (Pérez, 2002). Además, se realizan las pruebas de análisis de la varianza con tal de poder mostrar equivalentes representaciones gráficas a las obtenidas en los trabajos de Coronado-Hernández (2016) y los de Omar et al. (2009). Los análisis y las conclusiones se realizarán de los resultados de las pruebas de la mediana de Mood.

6.5 Análisis del comportamiento de la distribución de los costes totales de las propuestas de planificación obtenidas

En primer lugar, se analizaron los efectos de los diferentes factores y sus niveles u opciones sobre los costes totales, suma de los costes de los periodos ejecutados dentro de los 8 periodos de planificación, en los 52 tramos en los que se planifica seleccionados.

En la Tabla 6-5 se puede observar el análisis de la varianza de los costes totales (*TCR_52*) y las contribuciones de cada factor eliminando los efectos de los demás factores. Se destaca el mayor impacto de la saturación y de la incertidumbre sobre los costes totales y la combinación de los factores de tipo de demanda y saturación por el mayor valor de sus Razón-F. Comparando los valores de Razón-F obtenidos con los resultados del trabajo de Coronado-Hernández (2016), se puede observar que después del factor de saturación, un elemento no incluido en su análisis, la incertidumbre también se encuentra como el factor con el mayor impacto.

Tabla 6-5: Análisis de la varianza de los costes totales - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Pareto	2,37E17	5	475,6E14	278	0,0000
B:Tipo_demanda	21,15E17	4	5.287,7E14	3.101	0,0000
C:Incertidumbre	69,69E17	5	13.938,9E14	8.174	0,0000
D:BOM	33,09E17	5	6.618,9E14	3.881	0,0000
E:Saturación	46,71E17	3	15.571,1E14	9.131	0,0000
INTERACCIONES					
AB	0,28E17	20	14,1E14	8	0,0000
AC	1,09E17	25	43,6E14	25	0,0000
AD	0,15E17	25	6,3E14	3	0,0000
AE	0,34E17	15	22,8E14	13	0,0000
BC	2,15E17	20	107,6E14	63	0,0000
BD	2,62E17	20	131,1E14	76	0,0000
BE	23,29E17	12	1.941,3E14	1.138	0,0000
CD	2,64E17	25	105,8E14	62	0,0000
CE	0,13E17	15	9,1E14	5	0,0000
DE	6,93E17	15	462E14	271	0,0000
RESIDUOS	88,02E17	51.625	1,7E14		
TOTAL (CORREGIDO)	300,72E17	51.839			

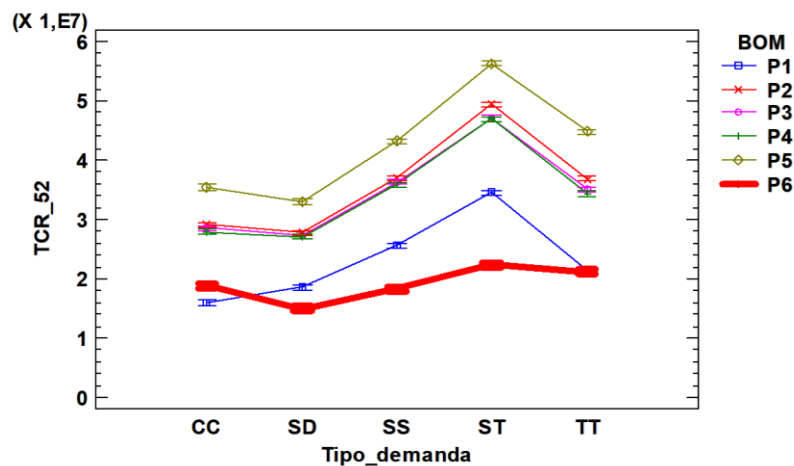
Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual, *Gl* grados de libertad del factor. Fuente: Elaboración propia con el programa Statgraphics Centurion XVII.

La representación gráfica de los resultados permite observar las interacciones entre los distintos tipos de demanda, la estructura de producto (*BOM*), factor de Pareto, incertidumbre sobre la demanda en cada nuevo tramo en el que se planifica y la saturación de los recursos, sobre el coste de los 52 periodos de estudio (*TCR₅₂*).

En la Figura 6-6 se puede observar el comportamiento de los distintos tipos de estructura de producto y de los diferentes tipos de demanda respecto de los costes totales. Se destaca que la estructura de producto tipo (*P6*), con una alternativa de proceso, está menos influenciada por los diferentes tipos de patrones de demanda con respecto a los costes totales y presenta los costes totales más bajos, tal y como se puede apreciar en la Figura 6-8.

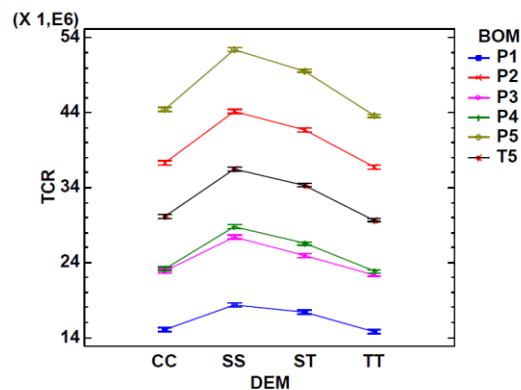
La Figura 6-7 recoge los resultados equivalentes del trabajo de Coronado-Hernández (2016), que destaca el patrón de demanda estacional (*SS*) con un coste total más alto que el que se observa en la Figura 6-9. En las instancias de este trabajo, el patrón de la demanda estacional creciente (*ST*) es el que presenta los costes totales más altos que se puede apreciar en la Figura 6-9. Las diferencias que justifican este resultado se encuentran en el trabajo de Coronado-Hernández (2016), en el que los patrones de las demandas presentan diferentes multiplicadores, el patrón de la demanda estacional (*SS*) es multiplicado por 1.4 y la demanda estacional creciente (*ST*) por 1.2, en comparación con un valor constante de 1 en las instancias utilizadas en este trabajo. Los diferentes tipos de demandas de este trabajo se puede apreciar en la Tabla 5-4. De ambos trabajos, se destaca cómo la estacionalidad genera un aumento en los costes totales, aunque es de magnitud menor que el aumento generado por las estructuras de producto.

Figura 6-6: Interacciones entre tipo de demanda y estructura de producto sobre los costes totales y 95% de Fisher LSD



TCR₅₂ costes totales en los 52 periodos de análisis, *BOM* tipo de producto. Fuente: Elaboración propia con el programa Statgraphics Centurion XVII.

Figura 6-7: Interacciones entre tipo de demanda y estructura de producto sobre los costes totales y 95% del Fisher LSD (Coronado-Hernández, 2016)

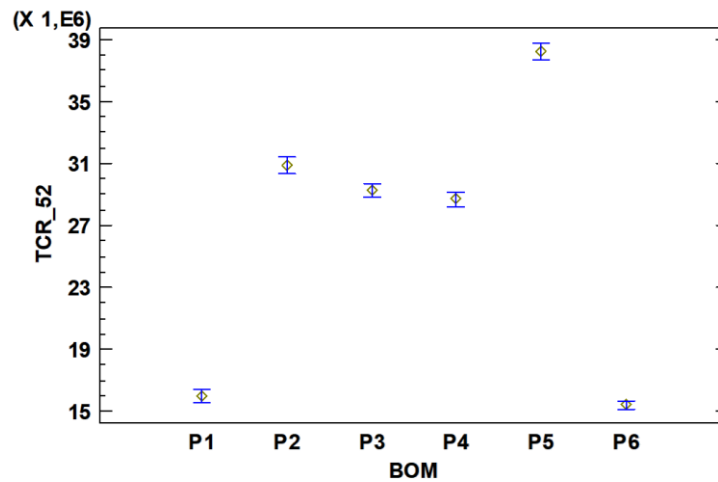


TCR costes totales. DEM tipo de demanda, BOM tipo de estructura de producto. Fuente: Extraído del trabajo de Coronado-Hernández (2016).

La Figura 6-8 permite observar cómo los costes totales de la estructura de producto (*P6*) son cercanos a la estructura de producto (*P1*), siendo estos los de menores costes totales. Además, permite observar que la estructura de producto (*P5*) genera los mayores costes totales en comparación con el resto de estructuras. La estructura de producto (*P5*) es la estructura con más niveles de subproductos. Equivalentes condiciones se encuentra en el trabajo de Coronado-Hernández (2016) que se puede apreciar en la Figura 6-7, con su estructura de producto (*P5*).

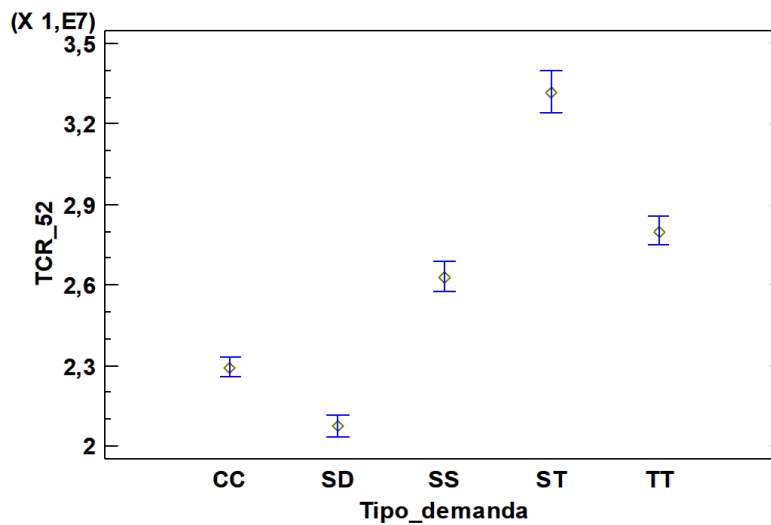
En la Figura 6-9 se analiza exclusivamente la influencia de los patrones de demanda con los costes totales y se observa cómo el patrón de demanda estacional creciente (*ST*) presenta los costes más altos en las instancias presentadas en este capítulo. El patrón de demanda estacional decreciente (*SD*) es el que genera los costes totales más bajos en las distintas instancias, por debajo de la demanda constante (*CC*). Las instancias se han resuelto buscando minimizar la función objetivo de los costes totales para cada tramo en el que se planifica. Por lo tanto, en un patrón de demanda decreciente, las incertidumbres se compensan con los stocks decrecientes. Los costes por retrasos son de mayor importancia que los costes de preparación o almacenamiento y, por lo tanto, cuando la demanda es estacional decreciente los costes totales son menores.

Figura 6-8: Gráfico de medianas de opciones del factor tipo de producto respecto los costes totales con intervalos del 95% de confianza



TCR_52 costes totales en los 52 periodos de análisis, BOM tipo de producto. Fuente: Elaboración propia con el programa Statgraphics Centurion XVII.

Figura 6-9: Gráfico de medianas de opciones del factor tipo de demanda respecto los costes totales con intervalos del 95% de confianza.

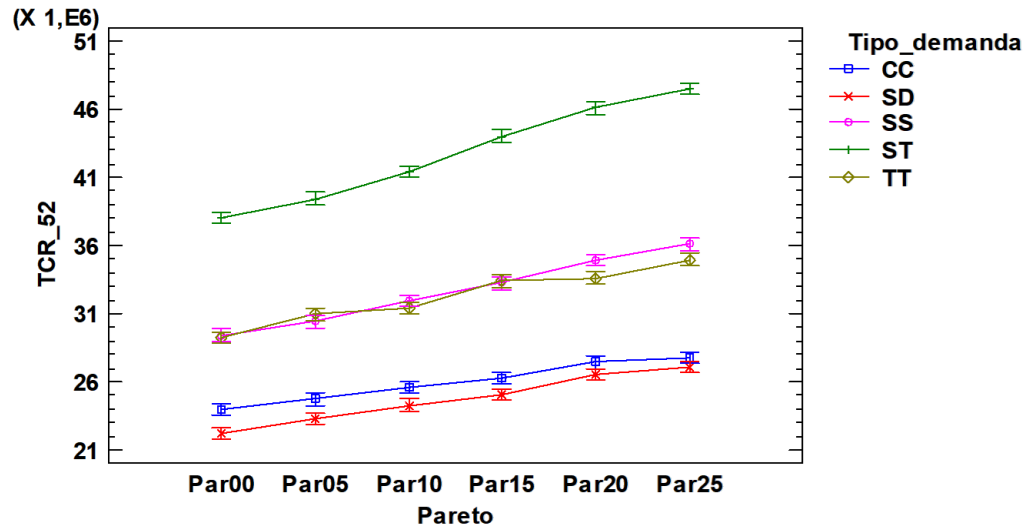


TCR_52 costes totales en los 52 periodos de análisis. Fuente: Elaboración propia con el programa Statgraphics Centurion XVII.

La Figura 6-10 y la Figura 6-11 muestran la relación entre el patrón de la demanda y la distribución irregular de la demanda (*Pareto*). Se puede apreciar cómo todos los patrones de la demanda presentan un incremento en los costes totales a medida que aumenta la distribución irregular de la demanda. Por otro lado, se observa la afinidad de comportamiento en los costes totales del patrón de la demanda constante (CC) y el de patrón estacional decreciente (SD) o estacional (SS) o creciente (TT) con respecto a la distribución irregular de la demanda. En la Figura 6-11 del trabajo de Coronado-Hernández (2016) se observa que también aumentan sus costes con el aumento de la distribución irregular de la demanda. De ambos trabajos, se destaca

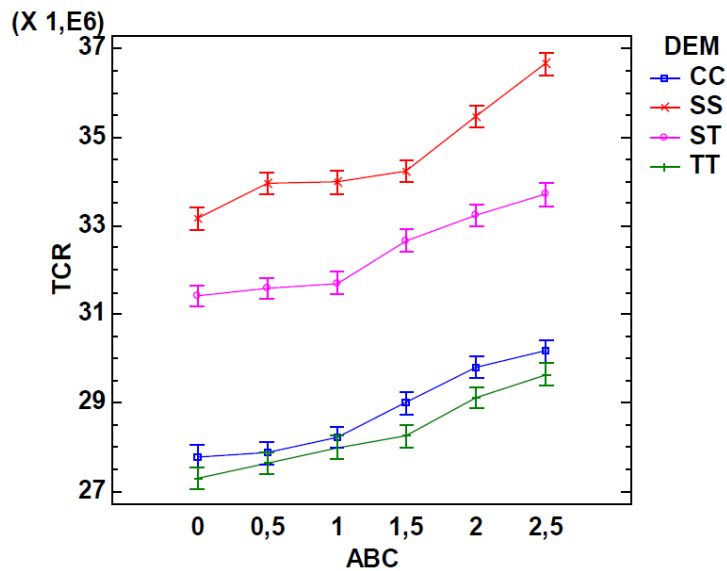
como el tipo de demanda, especialmente la estacional, genera mayores costes totales que los aumentos de costes generados por la distribución irregular de la demanda (*Pareto*).

Figura 6-10: Interacciones entre factor de Pareto y tipo de demanda sobre los costes totales y 95% de Fisher LSD



TCR_52 costes totales en los 52 periodos de análisis, *Pareto* factor de Pareto. Fuente: Elaboración propia con el programa Statgraphics Centurion XVII.

Figura 6-11: Interacciones entre tipo de demanda y factor Pareto sobre los costes totales y 95% del Fisher LSD (Coronado-Hernández, 2016)

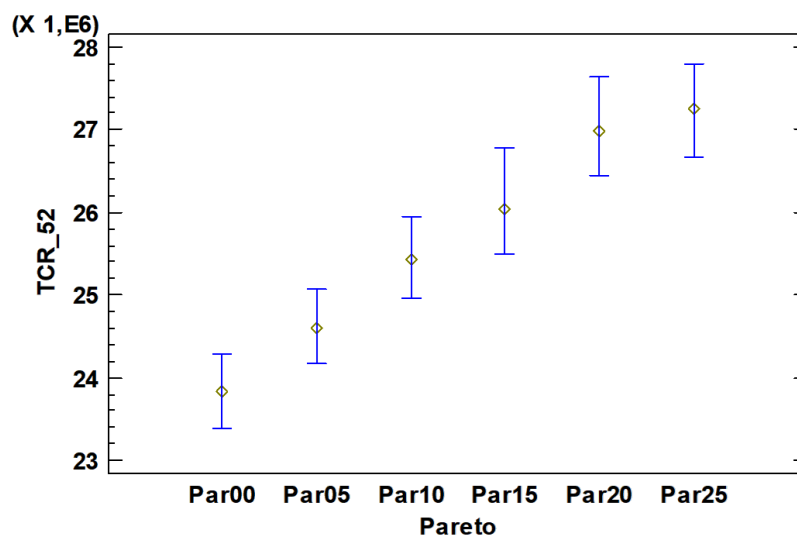


DEM tipo de demanda, *ABC* factor de Pareto, *TCR* coste totales. Fuente: Extraído del trabajo de Coronado-Hernández (2016).

En la Figura 6-12 se puede observar el comportamiento específico de la influencia del factor de la distribución irregular de la demanda (*Pareto*) en los costes totales, donde los costes aumentan a medida que aumenta la irregularidad, aunque sus diferentes distribuciones tienen costes totales afines dentro de los intervalos de confianza del 95%. Se observan diferencias

significativas entre la distribución de los resultados de dos niveles del factor. Por ejemplo, entre *Par00* y *Par10* hay diferencias estadísticas significativas con intervalos de confianza del 95%, pero no entre *Par00* y *Par05*. Por otro lado, la variación en los costes totales no es apreciable cuando se compara entre los últimos niveles del factor, entre *Par20* con respecto a *Par25*. Las variaciones en los costes totales debido a la distribución irregular de la demanda no son tan importantes como las variaciones de costes encontradas entre los distintos tipos de producto. Se puede apreciar en la Figura 6-8 respecto de la Figura 6-9 como las variaciones entre los tipos de producto presentan mayores diferencias que las variaciones entre los tipos de distribución irregular de demanda.

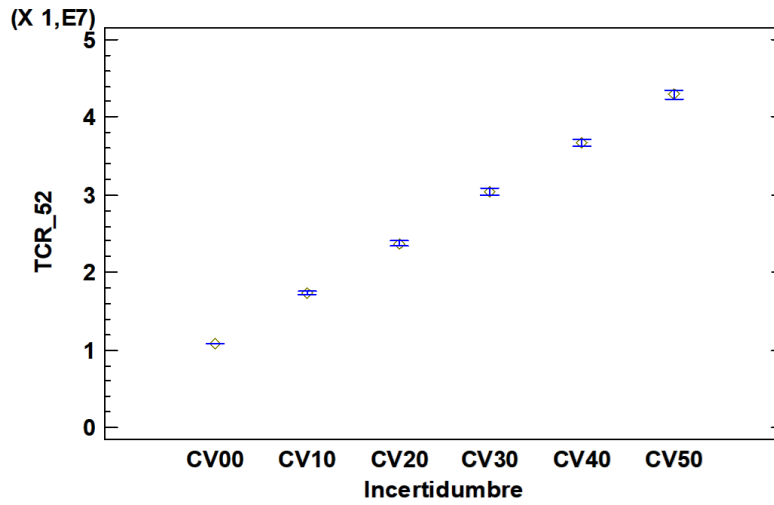
Figura 6-12: Gráfico de medianas de niveles del factor Pareto respecto los costes totales con intervalos del 95% de confianza.



TCR_52 costes totales en los 52 periodos de análisis, *Pareto* factor de Pareto. Fuente: Elaboración propia con el programa Statgraphics Centurion XVII.

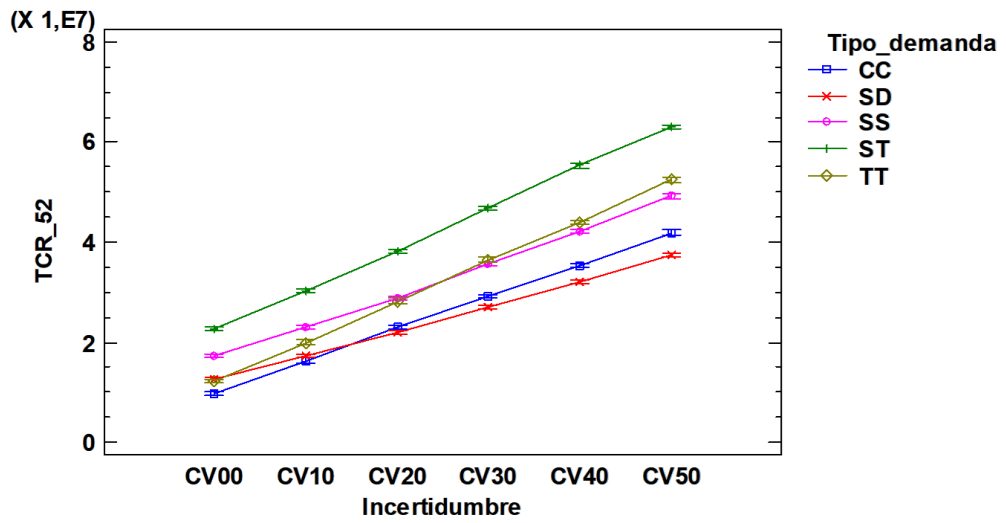
Al estudiar la interacción de la incertidumbre de la demanda (*CV*) en los costes totales en la Figura 6-13, se puede concluir que el incremento en la incertidumbre provoca un claro incremento en los coste totales. El factor de incertidumbre presenta las mayores diferencias en los costes totales. La incertidumbre tiene una mayor repercusión en los costes por retraso. Estos son de mayor importancia que los costes de preparación o almacenamiento. Si se observa la interacción que existe entre el factor del patrón de la demanda (*Tipo_demanda*) y la incertidumbre de la demanda (*CV*) en la Figura 6-14 y la Figura 6-15, se destaca que el patrón de la demanda estacional decreciente (*SD*) está menos influenciado por la incertidumbre que el resto de patrones.

Figura 6-13: Gráfico de medianas de niveles del factor incertidumbre respecto los costes totales con intervalos del 95% de confianza.



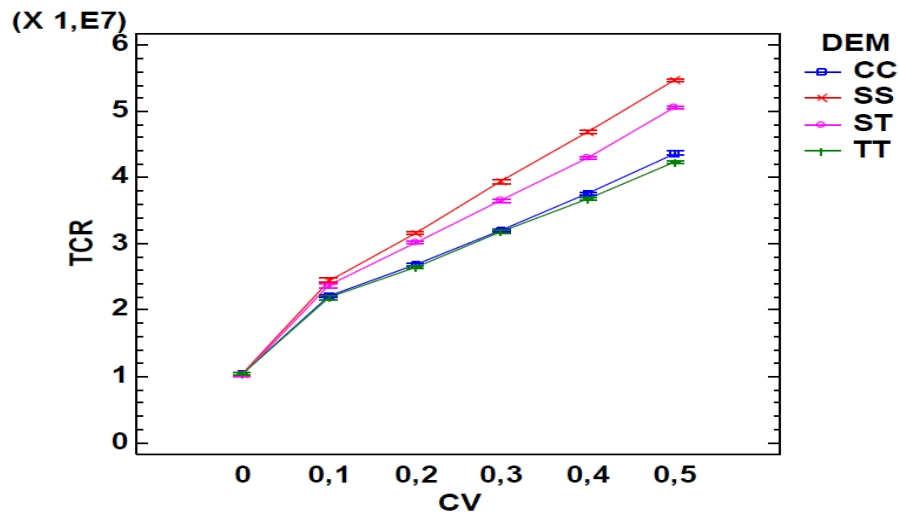
TCR_52 costes totales en los 52 periodos de análisis, *Incertidumbre* niveles de incertidumbre. Fuente: Elaboración propia con el programa Statgraphics Centurion XVII.

Figura 6-14: Interacciones entre tipo de demanda y la incertidumbre sobre los costes totales y 95% de Fisher LSD.



TCR_52 costes totales en los 52 periodos de análisis, *Incertidumbre* niveles de incertidumbre. Fuente: Elaboración propia con el programa Statgraphics Centurion XVII.

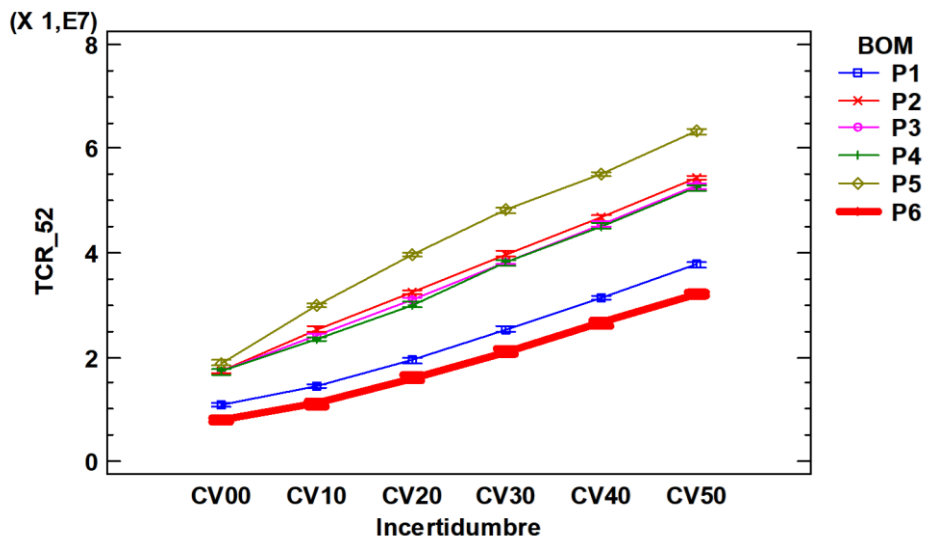
Figura 6-15: Interacciones entre tipo de demanda e incertidumbre sobre los costes totales y 95% del Fisher LSD (Coronado-Hernández, 2016)



DEM tipo de demanda, CV nivel de incertidumbre, BOM tipo de producto, TCR Costes totales. Fuente: Extraído del trabajo de Coronado-Hernández (2016).

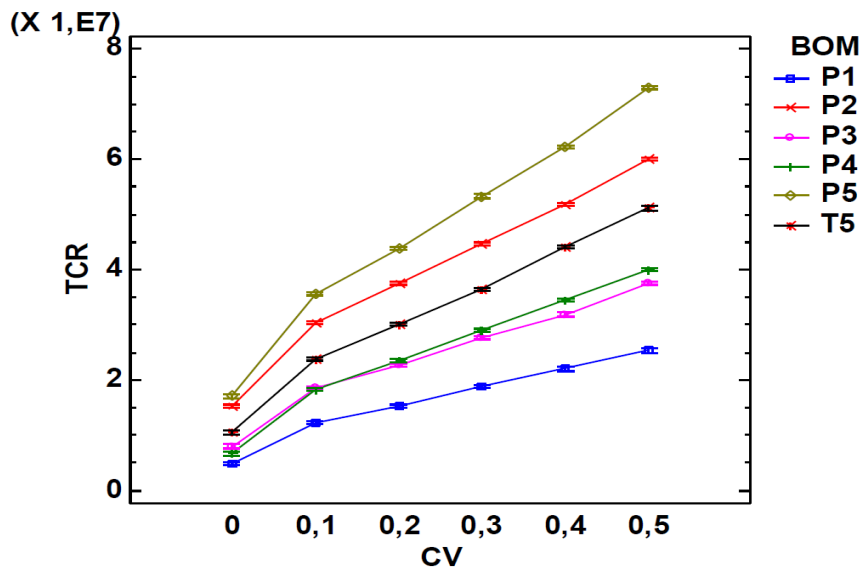
Los efectos de la incertidumbre (CV) varían en función del tipo de producto (BOM). Se puede observar en la Figura 6-16 y Figura 6-17 que las estructuras de producto (P6), con alternativas, y (P1) presentan un menor incremento de costes totales con el aumento de la incertidumbre. Por el contrario, la estructura de producto (P5), con más niveles de subproductos o periodos necesarios para realizar todas las operaciones necesarias para obtener los SKUs finales, presenta mayores incrementos de costes totales con el aumento de la incertidumbre.

Figura 6-16: Interacciones entre el factor del tipo de producto y la incertidumbre sobre los costes totales y 95% de Fisher LSD.



TCR_52 costes totales en los 52 periodos de análisis, BOM tipo de producto. Fuente: Elaboración propia con el programa Statgraphics Centurion XVII.

Figura 6-17: Interacciones entre incertidumbre y el factor de tipo de producto sobre los costes totales y 95% del Fisher LSD (Coronado-Hernández, 2016)



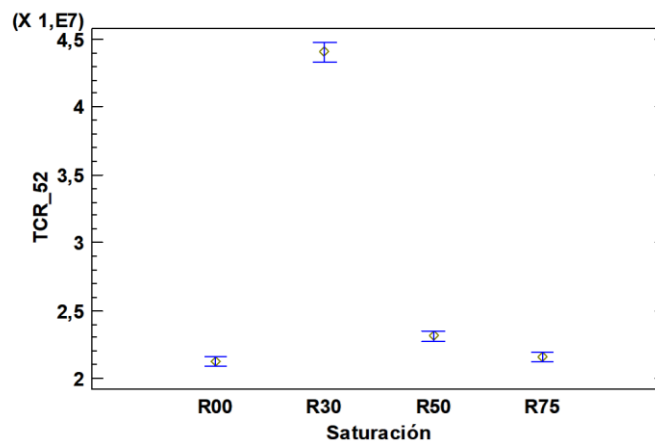
CV incertidumbre, BOM tipo de producto, TCR Costes totales. Fuente: Extraído del trabajo de Coronado-Hernández (2016).

En la Figura 6-18 se puede evaluar la influencia de la saturación de la capacidad disponible de todos los recursos. Para niveles de capacidad disponible del 30% (*R30*) es cuando se producen los mayores costes totales del sistema, principalmente por las penalizaciones por retrasos a los requerimientos de la demanda. La falta de recursos disponible (*R30*) genera los mayores costes totales en comparación a los otros factores como el tipo de demanda, la distribución de la demanda, el tipo de producto o la incertidumbre. Solo niveles de incertidumbre del 50% llegan a acercarse a los niveles de costes totales generados por la falta de recursos disponibles. La falta de recursos disponibles imposibilita cumplir con los requerimientos de la demanda generando grandes costes por retraso.

Por otro lado, no se destacan variaciones significativas entre la disposición del 100% de la capacidad (*R00*) y el 75% de disponibilidad (*R75*). Esta reducción del 25% aún deja niveles suficientes de capacidad disponible en los recursos para poder satisfacer las demandas solicitadas. Sólo con una reducción del 50% (*R50*) se aprecian incrementos, estadísticamente significativos en confianza del 95%, en los costes totales. Y cuando la reducción es del 70% (*R30*), afecta significativamente los costes totales, principalmente en los costes por retraso, ya que estos son de mayor peso relativo que los costes de producción o almacenaje.

En la instancia Par00_ST_CV10_P1_R30_1 los costes totales debidos a la penalización por rotura de stock son del 89% frente al 10% por los costes de preparación o set up y en la instancia Par00_ST_CV10_P1_R00_1 son del 23% de penalizaciones por rotura de stock frente al 69% de set up. Por lo tanto, se puede observar cómo la falta de recursos (*R30*) implica un incremento en los costes por rotura de stock respecto de los costes de preparación.

Figura 6-18: Gráfico de medianas de niveles del factor saturación respecto los coste totales con intervalos del 95% de confianza.



TCR_52 costes totales en los 52 periodos de análisis, R00 100% de la capacidad disponible, R75 75% de la capacidad disponible en todos los recursos. Fuente: Elaboración propia con el programa Statgraphics Centurion XVII.

Se puede entender que en entornos con patrones de la demanda estacional creciente (*ST*), se presentan los costes más altos, similares a los resultados de Omar et al. (2009) y se diferencia del trabajo de Coronado-Hernández (2016) por presentar otros multiplicadores. Del mismo modo, cuando el factor de tipo de producto es con más niveles, tipo *P5*, los costes totales aumentan. La incertidumbre en la demanda tiene una relación directa con el incremento de los costes, debido a la generación de mayores penalizaciones por retrasos en el servicio, dado que el sistema no tiene existencias disponibles de subproductos para satisfacer esas variaciones o incrementos en la demanda. Por otro lado, una mayor distribución irregular entre los SKUs finales, factor de Pareto, genera mayores costes en el sistema, una conclusión equivalente se encuentra en el trabajo de Coronado-Hernández (2016).

Por último, la reducción de la capacidad disponible de los recursos genera más retrasos por la insuficiencia de capacidad para satisfacer las demandas, provocando un incremento en los costes totales de los 52 periodos en análisis. Este factor de la saturación no es analizado en el trabajo de Coronado-Hernández (2016) ni en el de Omar & Bennell (2009).

6.6 Análisis del comportamiento del nerviosismo tipo I de las propuestas de planificación obtenidas

En este apartado se presenta el análisis del nerviosismo tipo I en la cadena de suministro debido a los distintos efectos de los factores y niveles de estudio. Para medir el nerviosismo, en este apartado, se utiliza la Ecuación 6.7, que evalúa los cambios de las órdenes de preparación de los *strokes* entre tramos en los que se planifica, como un cociente respecto del número de órdenes de preparación totales que se ejecutan en la simulación de los 52 periodos de análisis.

En la Tabla 6-6 se puede observar el análisis de la varianza sobre el nerviosismo tipo I (*ISR1*) y las contribuciones de cada factor, eliminando los efectos de los demás factores. El peso de la

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

incertidumbre sobre el nerviosismo de tipo I se destaca por los valores de “Razón-F”. El mayor valor de la “Razón-F” indica que las variaciones de la incertidumbre generan los mayores incrementos del nerviosismo tipo I. El análisis del nerviosismo tipo I no se encuentra en el trabajo de Coronado-Hernández (2016) o de Omar & Bennell (2009), realizándose únicamente el análisis del nerviosismo tipo II que se analiza más adelante.

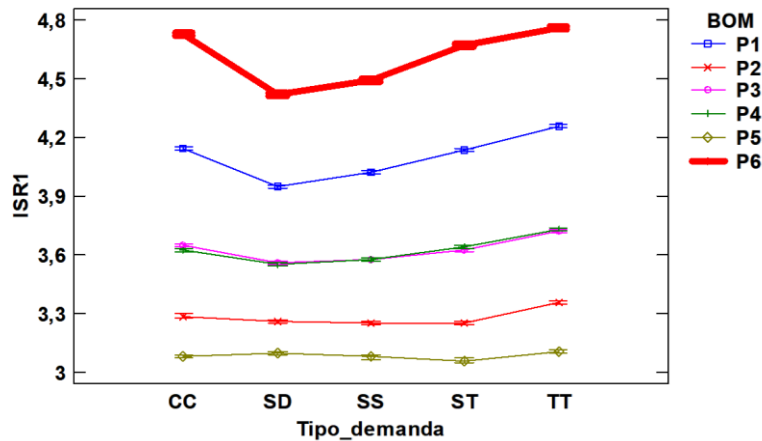
Tabla 6-6: Análisis de la varianza para ISR1 - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Pareto	1.944	5	388,9	5.948	0,0000
B:Tipo_demanda	214	4	53,6	820	0,0000
C:Incertidumbre	68.793	5	13758,7	210.389	0,0000
D:BOM	13.424	5	2684,9	41.056	0,0000
E:Saturación	198	3	66,1	1.011	0,0000
INTERACCIONES					
AB	31	20	1,5	24	0,0000
AC	343	25	13,7	209	0,0000
AD	266	25	10,6	163	0,0000
AE	186	15	12,4	190	0,0000
BC	131	20	6,5	100	0,0000
BD	114	20	5,7	87	0,0000
BE	107	12	8,9	136	0,0000
CD	2.269	25	90,7	1.388	0,0000
CE	504	15	33,6	514	0,0000
DE	99	15	6,6	101	0,0000
RESIDUOS	3.376	51.625	0,06		
TOTAL (CORREGIDO)	92.006	51.839			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual, *Gl* grados de libertad del factor. Fuente: Elaboración propia con el programa Statgraphics Centurion XVII.

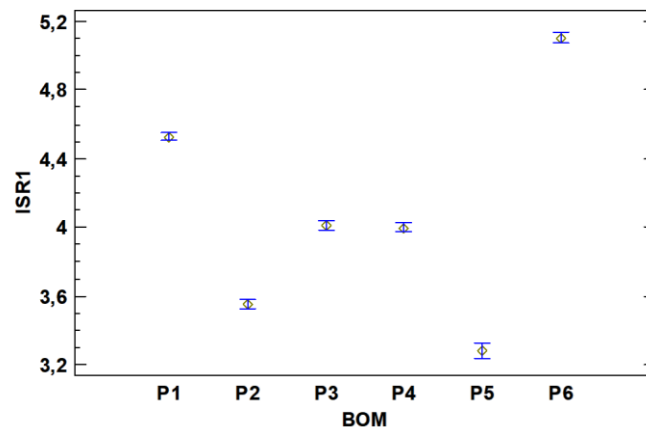
En la Figura 6-19 y la Figura 6-20 se puede observar que la complejidad del producto afecta al nerviosismo tipo I, donde las estructuras con más niveles de subproductos tipo (*P5*) tienen menos variaciones en la planificación, con respecto de arrancar o no la producción en ese periodo. Esto se debe al hecho de que los valores más bajos en (*ISR1*), definido en la Ecuación 6.7, indican una mayor estabilidad en la planificación. Por otro lado, las estructuras de producto (*P6*), con operaciones alternativas, donde los cambios se pueden hacer más fácilmente en la planificación para lograr el mismo resultado, afectan negativamente la estabilidad de la planificación, nerviosismo tipo I. Del mismo modo, la estructura de producto con un solo nivel de subproductos (*P1*) presenta altos niveles de nerviosismo tipo I.

Figura 6-19: Interacciones entre tipo de demanda y estructura de producto sobre ISR1 y 95% de Fisher LSD.



Fuente: Elaboración propia con el programa Statgraphics Centurion XVII.

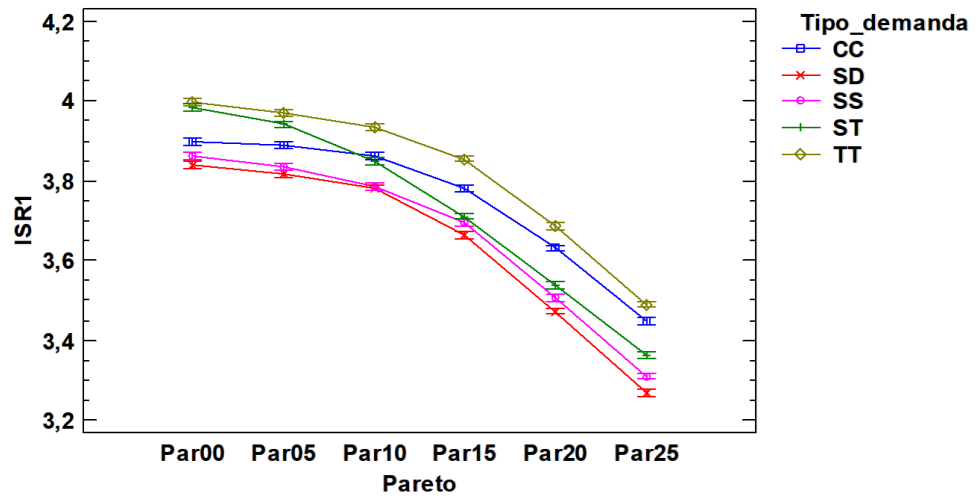
Figura 6-20: Gráfico de medianas de opciones del factor tipo de producto respecto ISR1 con intervalos del 95% de confianza



Fuente: Elaboración propia con el programa Statgraphics Centurion XVII.

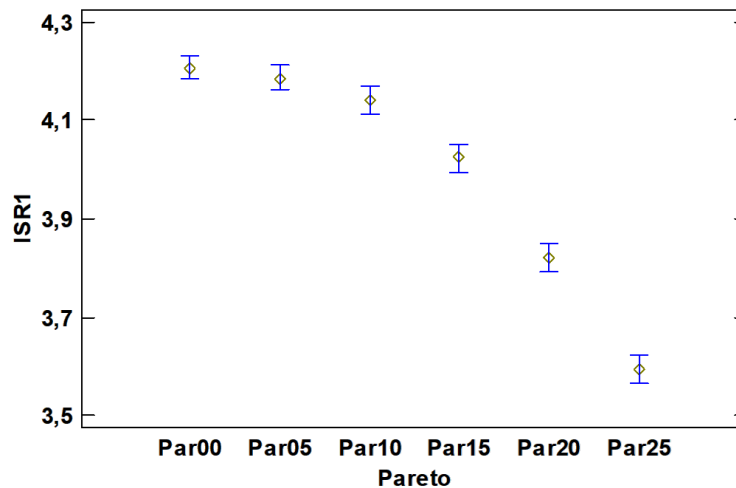
En la Figura 6-21 y la Figura 6-22, se observa que cuando la demanda se concentra en unos pocos productos (*Par25*), hay menos cambios posibles en la planificación, de modo que se reduce el nerviosismo tipo I. Por el contrario, en las distribuciones de la demanda homogéneas entre los productos finales (*Par00*, *Par05*), donde hay simetría en el reparto de la demanda entre los 10 productos finales de cada instancia, son más habituales los cambios de planificación entre productos en los distintos periodos en cada tramo en el que se planifica. Al comparar la Figura 6-22 con los resultados de la Figura 6-12 con respecto a los costes totales, se observa un comportamiento opuesto, mayores diferencias entre los factores (*Par25*) y (*Par20*) que entre (*Par00*) y (*Par05*). Hay diferencias significativas mayores del 95% entre la distribución de las medianas con el factor de Pareto (*Par25*) y aquellas instancias con el factor de Pareto (*Par20*) en el nerviosismo tipo I. Por otro lado, no se encuentran diferencias significativas entre (*Par00*) y (*Par05*) en el nerviosismo tipo I y sí se encontraban con respecto a los costes totales.

Figura 6-21: Interacciones entre factor de Pareto y tipo de demanda sobre ISR1 y 95% de Fisher LSD



Fuente: Elaboración propia con el programa Statgraphics Centurion XVII.

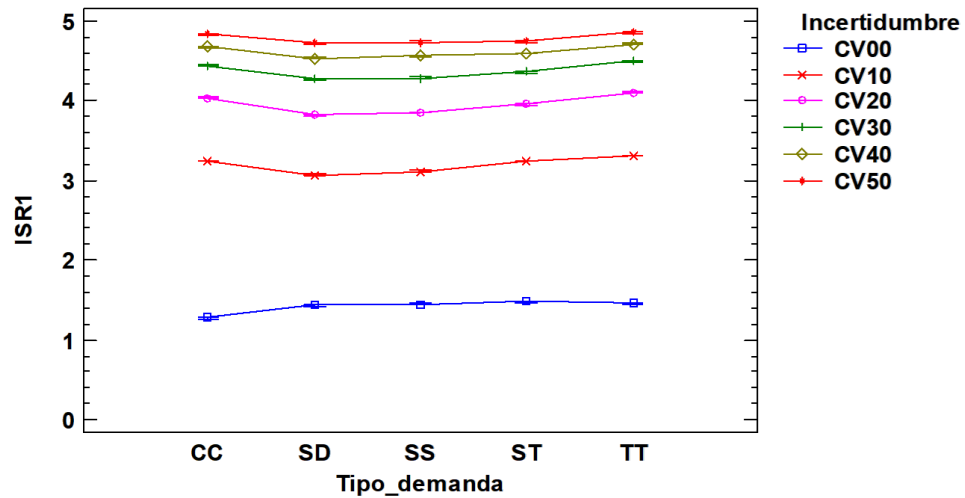
Figura 6-22: Gráfico de medianas de niveles del factor Pareto respecto ISR1 con intervalos del 95% de confianza



Fuente: Elaboración propia con el programa Statgraphics Centurion XVII.

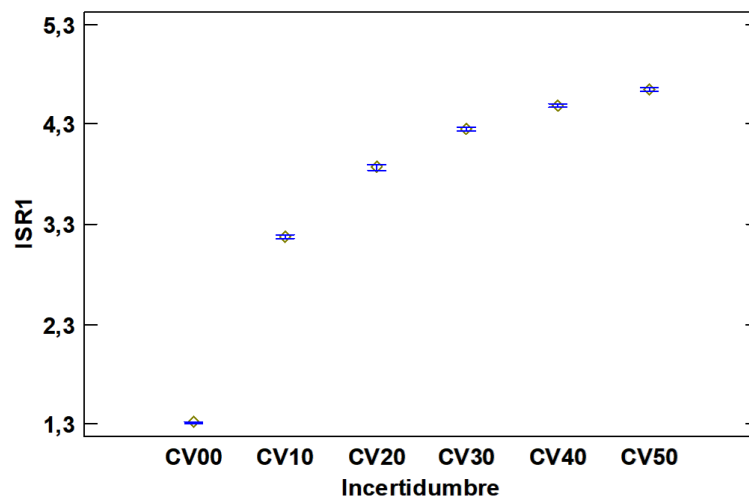
En la Figura 6-23 y en la Figura 6-24 se observa que la mayor incertidumbre en la demanda ($CV50$) da como resultado un mayor nerviosismo tipo I, independientemente del patrón de la demanda, pero inferior al nerviosismo tipo I de las estructuras de producto ($P6$) que se apreciaba en la Figura 6-20. Este incremento del nerviosismo tipo I con respecto al incremento en la incertidumbre en la demanda que se observar de la Figura 6-24, sigue una curva logarítmica de base mayor que la unidad. La curva presenta mayores diferencias entre ($CV00$) y ($CV10$) que entre ($CV40$) y ($CV50$).

Figura 6-23: Interacciones entre tipo de demanda y la incertidumbre sobre ISR1 y 95% de Fisher LSD



Fuente: Elaboración propia con el programa Statgraphics Centurion XVII.

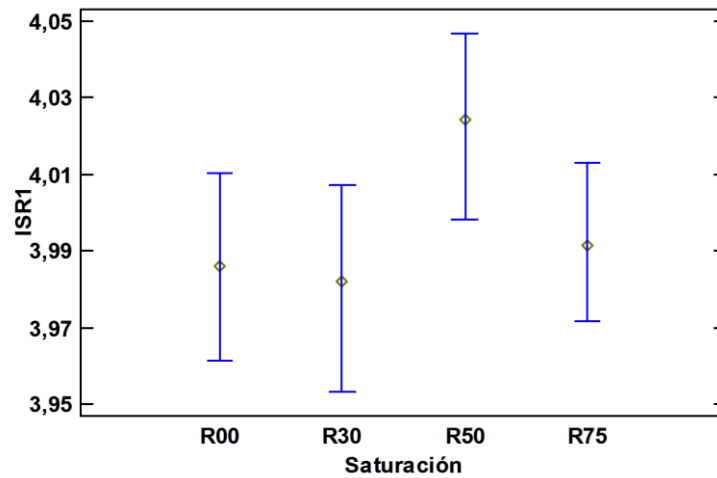
Figura 6-24: Gráfico de medianas de niveles del factor incertidumbre respecto ISR1 con intervalos del 95% de confianza.



Fuente: Elaboración propia con el programa Statgraphics Centurion XVII.

En la Figura 6-25 se observa que las medianas de las muestras no son significativamente diferentes con un nivel de confianza del 95% (el Valor-P es igual a 0,100655) con respecto al nerviosismo tipo I y los niveles del factor de saturación de los recursos disponibles. Por lo tanto, se puede concluir que los niveles del factor de saturación no tienen una repercusión específica en el nivel de nerviosismo tipo I. La saturación de los recursos disponibles tiene la mayor repercusión en los costes totales, como se ha visto con el nivel (R30) en la Figura 6-18. Pero destaca que no presenta diferencias significativas en el nerviosismo tipo I. La saturación de los recursos impide cumplir los requerimientos de la demanda, lo que aumenta los costes por retraso y con ello los costes totales, pero no conlleva modificaciones en la planificación entre distintos periodos de planificación que implicaría un incremento del nerviosismo tipo I.

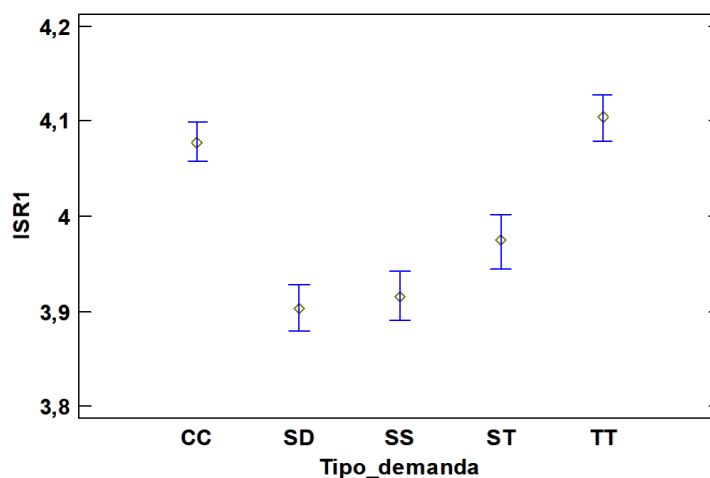
Figura 6-25: Gráfico de medianas de niveles del factor saturación respecto ISR1 con intervalos del 95% de confianza.



Fuente: Elaboración propia con el programa Statgraphics Centurion XVII.

La Figura 6-26 muestra que con las demandas constante (*CC*) o creciente (*TT*) se dan los casos de mayor nerviosismo tipo I con respecto al tipo de demanda. La homogeneidad de los patrones de la demanda constante (*CC*) y demanda creciente (*TT*) repercute en mayores cambios en las órdenes de operaciones, iniciar o no la orden según el periodo, generando mayor nerviosismo tipo I frente a demandas estacionales (*SD*, *SS*, *ST*). En las demandas estacionales hay un patrón de crecimiento y decrecimiento que marca la necesidad de arrancar las ordenes en ciertos periodos específicos frente a las demandas (*CC*) y (*TT*) que hay más libertad de arrancar en un periodo o en otro las operaciones. Pero el rango de nerviosismo tipo I que se recoge con los distintos tipos de demanda es inferior al rango de nerviosismo tipo I que se presenta con los distintos niveles de la incertidumbre que se puede apreciar en la Figura 6-24, o con la estructura de producto (*P6*) que se puede apreciar en la Figura 6-20.

Figura 6-26: Gráfico de medianas de opciones del factor tipo de demanda respecto ISR1 con intervalos del 95% de confianza



Fuente: Elaboración propia con el programa Statgraphics Centurion XVII.

Se puede observar, en entornos con estructuras de productos con menos niveles ($P1$), donde las operaciones de los productos finales se realizan en un solo periodo, o con alternativas ($P6$) los cambios en la planificación son más frecuentes, lo que afecta a mayores niveles de nerviosismo tipo I. Igualmente, las distribuciones de las demandas homogéneas entre los productos finales, ($Par00$), muestran mayores cambios en la planificación de un producto a otro, nerviosismo tipo I. Los niveles de la incertidumbre presentan las mayores diferencias en el nerviosismo tipo I, pero destaca sobre todos los niveles que las estructuras de producto ($P6$) tienen las mayores repercusiones sobre el nerviosismo tipo I. Cuando se encuentran más alternativas equivalentes en los sistemas se generan mayores nerviosismo tipo I. Por otro lado, destaca que la limitación de la capacidad disponible no tiene influencia significativa en el nerviosismo tipo I, en la decisión de arrancar o no en un periodo.

6.7 Análisis del comportamiento del nerviosismo tipo II de las propuestas de planificación obtenidas

En este apartado se presenta el análisis del nerviosismo tipo II en la cadena de suministro por los distintos efectos de los factores y niveles de estudio. Para medir el nerviosismo tipo II, en este apartado, se utiliza la Ecuación (6.8), que evalúa los cambios en el número de operaciones reprogramadas como un cociente respecto del número total de operaciones en toda la planificación que se ejecutan en la simulación de los 52 periodos de análisis.

En la Tabla 6-7 se puede observar el análisis de la varianza de los nerviosísimos tipo II ($ISR2$) y las contribuciones de cada factor eliminando los efectos de los demás factores. Se destaca el peso que tiene la incertidumbre sobre el nerviosismo tipo II por los valores de “Razón-F”.

Este nerviosismo tipo II es similar al evaluado en el trabajo de Coronado-Hernández (2016) o en el de Omar & Bennell (2009), pero en vez de ponderar las diferencias de cantidades de *strokes* planificados entre diferentes horizontes de planificaciones en cada periodo por el total de *strokes* ejecutados, se pondera por el número de periodos planificados, definido en la Ecuación (6.10). La propuesta utilizada para el nerviosismo tipo II permite reducir el efecto del número de *strokes* ejecutados, y poder comparar nerviosismo tipo II, aunque el número de *strokes* sea diferente. En este banco de instancias todas las instancias tienen el mismo número de periodos de planificación, por lo que no aporta diferencia dividirlo por el número de periodos planificados.

$$ISR^* = \frac{\sum_{k,ro,t} \|Z_{k,ro,t} - Z_{k,ro-1,t+1}\|}{S}; \text{ siendo } S \text{ el número total de periodos de planificación} \quad (6.10)$$

En el trabajo de Coronado-Hernández (2016), el factor con mayor contribución en el nerviosismo es el factor del tipo de demanda seguido de la incertidumbre. Comparando ambos indicadores, se observa que al ponderar por el número de periodos planificados no se está reduciendo la influencia del factor de patrón de la demanda como sí se observa en el indicador utilizado en este trabajo. En este trabajo el nerviosismo tipo II se obtiene ponderado por el número de

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

operaciones realizadas, definido en la Ecuación (6.8), por lo que se reduce el indicador cuando más operaciones son requeridas en ciertos tipos de demandas.

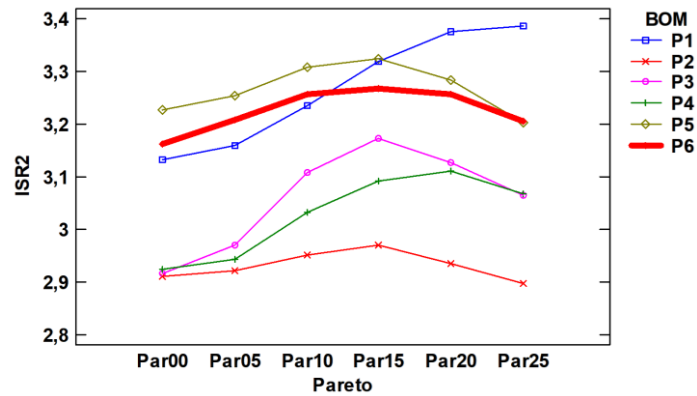
Tabla 6-7: Análisis de la varianza para ISR2 - Suma de Cuadrados Tipo III.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Pareto	145,61	5	29,12	321	0,0000
B:Tipo_demanda	101,52	4	25,38	279	0,0000
C:Incertidumbre	39.496,30	5	7.899,25	87.128	0,0000
D:BOM	879,07	5	175,81	1.939	0,0000
E:Saturación	1.030,07	3	343,35	3.787	0,0000
INTERACCIONES					
AB	121,61	20	6,08	67	0,0000
AC	39,67	25	1,58	17	0,0000
AD	85,79	25	3,43	37	0,0000
AE	877,46	15	58,49	645	0,0000
BC	35,49	20	1,77	19	0,0000
BD	22,37	20	1,11	12	0,0000
BE	29,48	12	2,457	27	0,0000
CD	737,75	25	29,51	325	0,0000
CE	81,738	15	5,44	60	0,0000
DE	26,00	15	1,733	19	0,0000
RESIDUOS	4.680,45	51.625	0,09		
TOTAL (CORREGIDO)	48.390,4	51.839			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual, *Gl* grados de libertad del factor. Fuente: Elaboración propia con el programa Statgraphics Centurion XVII.

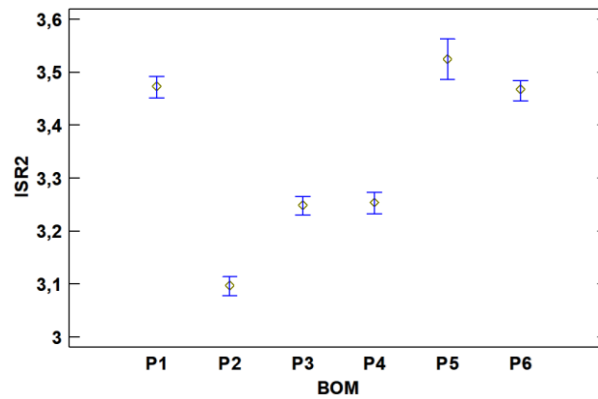
En la Figura 6-27 y la Figura 6-28 se puede observar que estructuras con más niveles de subproductos tipo (*P5*) o con menos niveles de subproducto tipo (*P1*) o con estructuras alternativas (*P6*) están sujetas a mayores cambios en la planificación de cantidades de *strokes* como recoge el nerviosismo tipo II. Las estructuras con alternativas de operaciones (*P6*) presentan niveles altos de nerviosismo tipo I, tal y como se apreciaba en la Figura 6-20, y tienen igualmente altos de nerviosismo tipo II. La no realización del arranque de las órdenes de operaciones que recoge el nerviosismo tipo I, implica igualmente la no realización de las cantidades de *stroke* que en esas órdenes se incluían, por lo tanto, los niveles altos de nerviosismo tipo I implican niveles altos de nerviosismo tipo II. Un caso equivalente es la estructura de producto (*P1*). Por otro lado, la estructura de producto tipo (*P5*) tenía bajos niveles de nerviosismo tipo I, pero en el caso del nerviosismo tipo II aparece con altos niveles. Se entiende que los productos tipo (*P5*), implican una estabilidad en la necesidad de iniciar las órdenes de operaciones, pero que las cantidades varían según las variaciones de la demanda entre los tramos en los que se planifica y amplificadas debido a que se deben planificar los subproductos teniendo en cuenta más periodos en la previsión de la demanda.

Figura 6-27: Interacciones entre el factor Pareto y la estructura de producto sobre ISR2 y 95% de Fisher LSD.



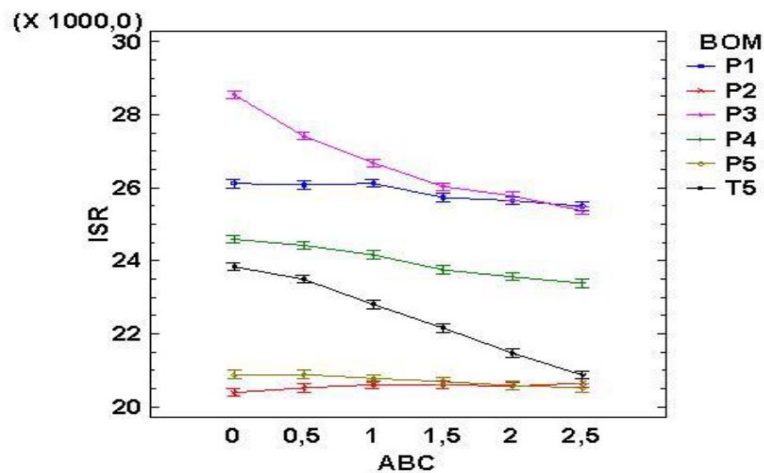
Fuente: Elaboración propia con el programa Statgraphics Centurion XVII.

Figura 6-28: Gráfico de medianas de opciones del factor tipo de producto respecto ISR2 con intervalos del 95% de confianza.



Fuente: Elaboración propia con el programa Statgraphics Centurion XVII.

Figura 6-29: Interacciones entre el factor Pareto y la estructura de producto sobre ISR* y 95% del Fisher LSD (Coronado-Hernández, 2016)

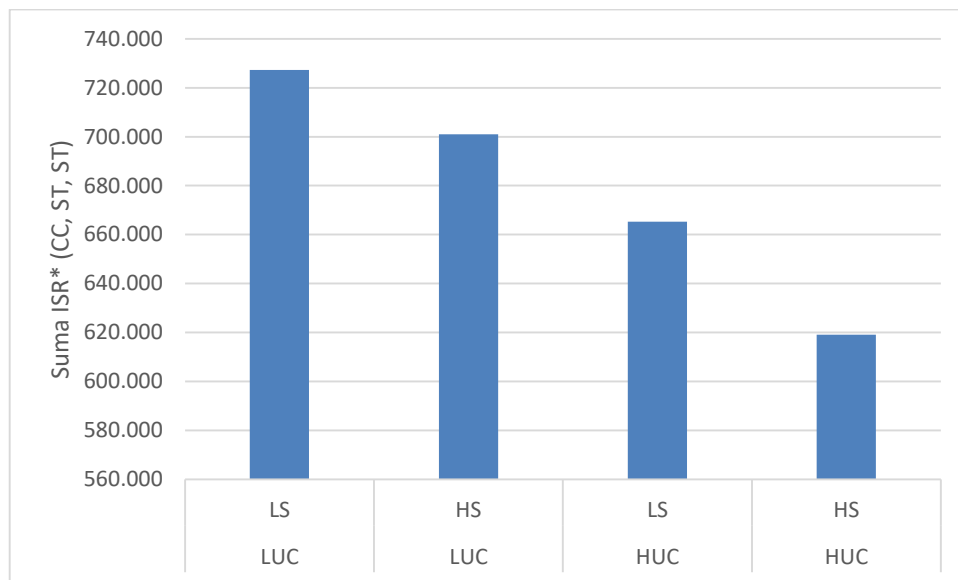


ISR* afín al ISR2. Fuente: Extraído del trabajo de Coronado-Hernández (2016).

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

Por otro lado, se observa de la Figura 6-30, del trabajo de Omar & Bennell (2009), que cuando los costes unitarios o los costes de preparación bajan, el indicador de nerviosismo sube y los costes unitarios son más importantes para definir el nivel de nerviosismo. Pero ese trabajo no contempla el número de periodos necesarios para llevar a cabo las distintas operaciones. En el trabajo de Omar & Bennell (2009), el nerviosismo ISR^* se mide de acuerdo con la Ecuación (6.10). Por lo tanto, este trabajo establece que cuando se necesitan más periodos para la realización de las distintas operaciones de un producto o servicio, el nerviosismo tipo I disminuye, pero el nerviosismo tipo II aumenta. Los productos que requieren más periodos para su completa realización tendrán una estabilidad con respecto a la necesidad de preparación de los ordenes de cada subproducto, el nerviosismo tipo I baja ($ISR1$), pero estarán sujetos a mayores cambios en las cantidades de *strokes* que se ejecutan en los sucesivos tramos en los que se planifica, el nerviosismo tipo II aumenta ($ISR2$).

Figura 6-30: Suma de niveles nerviosismo ISR^* en diferentes patrones de demanda con respecto a los costes unitarios y los costes de preparación.

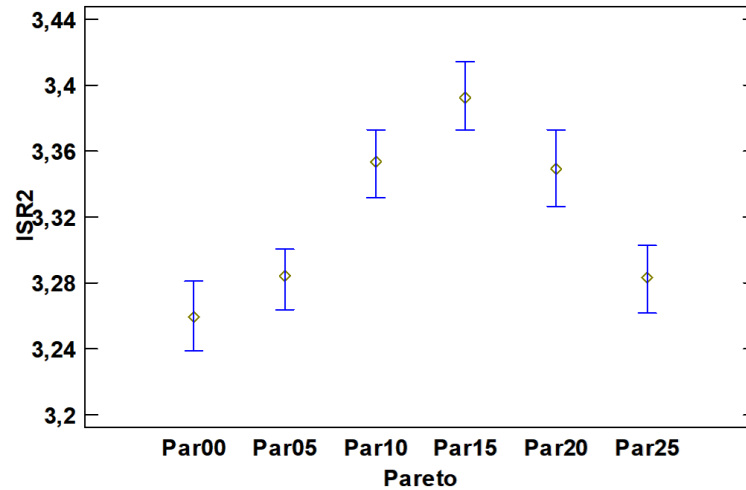


ISR^* afín al $ISR2$, LS low setup, HS high setup, LUC low unit cost, HUC high unit cost. Fuente: A partir del trabajo de Omar & Bennell (2009)

En la Figura 6-31, Figura 6-33 y la Figura 6-35 se observa que cuando la demanda se concentra en unos pocos productos según el factor Pareto ($Par25$), o se distribuye por igual ($Par00$), se produce un efecto de reducción en el nerviosismo tipo II. Pero en los valores intermedios del factor de Pareto ($Par15$) se encuentran los valores máximos de nerviosismo tipo II que se puede apreciar en la Figura 6-31. En los productos con igual distribución de la demanda ($Par00$), el índice de nerviosismo tipo II presenta valores bajos a pesar de que su nerviosismo tipo I tiene valores altos, ya que su distribución es igual entre los productos que se apreciaba en la Figura 6-22. Hay que destacar que son pequeñas las diferencias encontradas entre las medianas respecto del factor de Pareto en el nerviosismo tipo II. Esta pequeña diferencia se puede apreciar

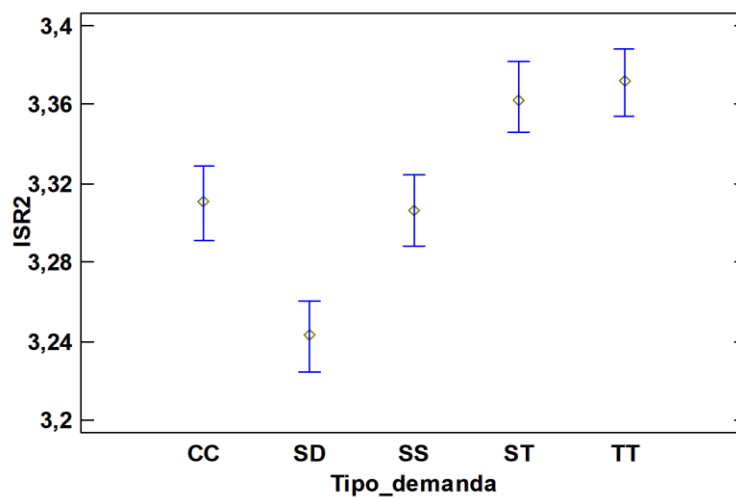
en las distribuciones que toman los valores de nerviosismo tipo II respecto de los niveles Par00, Par15 y Par25 que se puede apreciar en la Figura 6-34.

Figura 6-31: Gráfico de medianas del factor Pareto respecto ISR2 con intervalos del 95% de confianza.



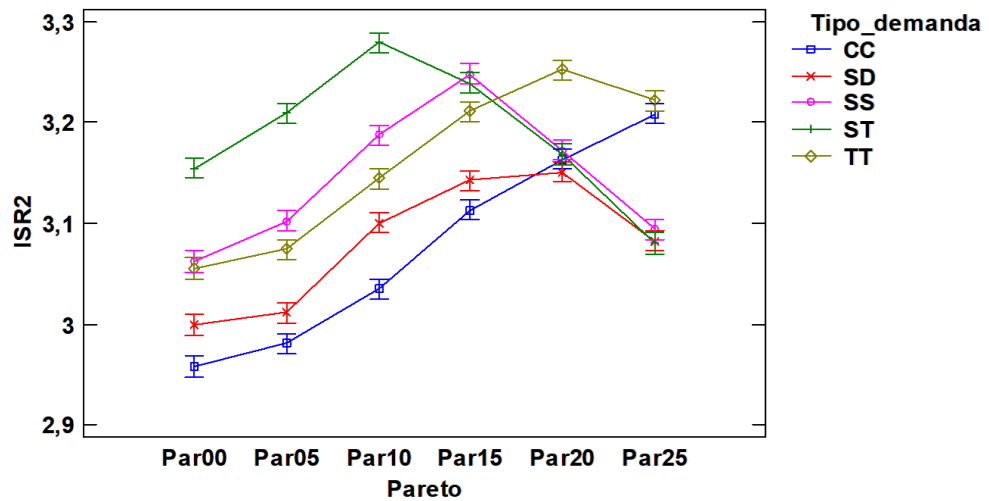
Fuente: Elaboración propia con el programa Statgraphics Centurion XVII.

Figura 6-32: Gráfico de medianas del factor tipo de demanda respecto ISR2 con intervalos del 95% de confianza.



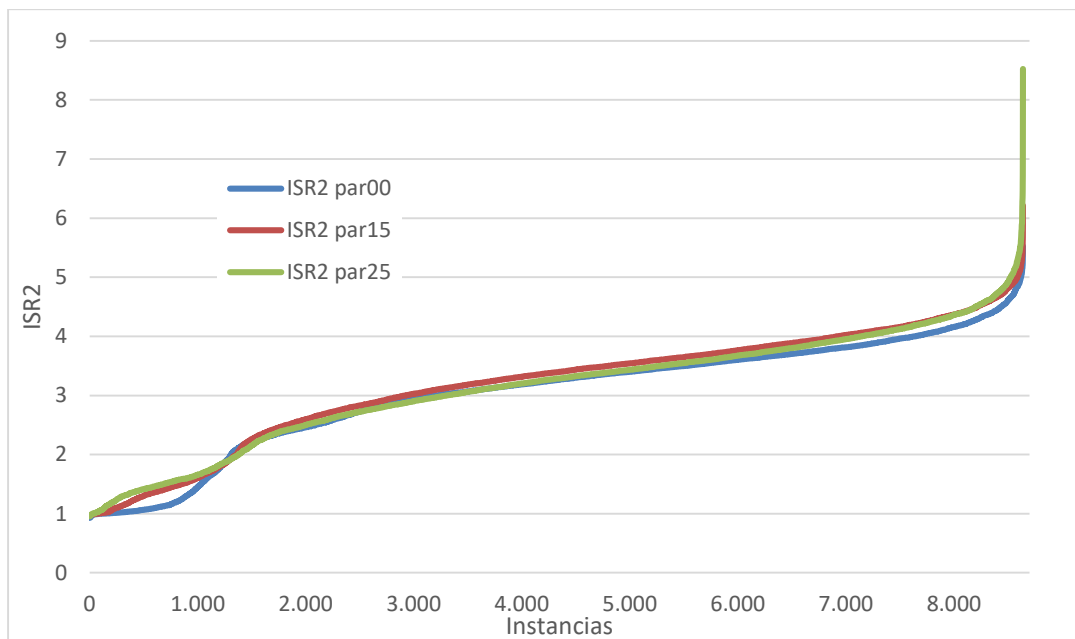
Fuente: Elaboración propia con el programa Statgraphics Centurion XVII.

Figura 6-33: Interacciones entre factor de Pareto y tipo de demanda sobre ISR2 y 95% de Fisher LSD



Fuente: Elaboración propia con el programa Statgraphics Centurion XVII.

Figura 6-34: Distribución de valores ISR2 respecto del factor Pareto

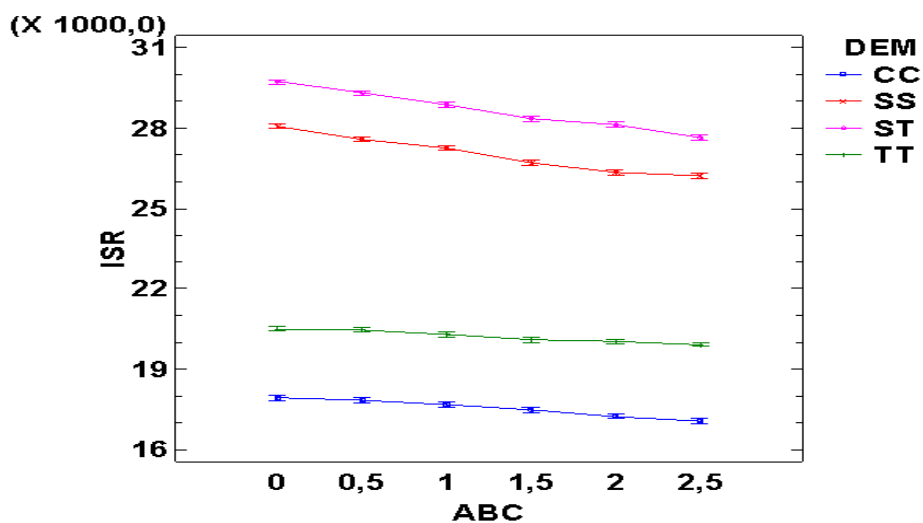


ISR2 par00 nivel de nerviosismo tipo II con distribución irregular de la demanda (Pareto) con α igual a 0. Fuente: Elaboración propia.

En el trabajo de Coronado-Hernández (2016), se aprecia una cierta reducción del nerviosismo (*ISR**) con el incremento de la desigualdad entre productos del factor de Pareto que se puede observar en la Figura 6-29, y que los patrones de demanda con estacionalidad aumentan la inestabilidad (*ISR**) que se puede observar en la Figura 6-35. Por el contrario, en la Figura 6-32 de este trabajo, se aprecia el incremento del nerviosismo tipo II con el incremento de la demanda *ST* y *TT*. Esta diferencia se explica por la ecuación utilizada en este trabajo para el

cálculo del nerviosismo tipo II recogida en la Ecuación (6.8). La influencia de la estacionalidad es reducida al incluir en el dividendo de la ecuación el total de *strokes* ejecutados. Pero, el crecimiento de la demanda está sujeto a un mayor factor de incertidumbre en la demanda (CV), según la ecuación definida en este trabajo con la Ecuación (5.2), de distribución normal centrada en la demanda media prevista. Por lo tanto, el incremento en la demanda (*TT* y *ST*) conlleva un mayor factor de incertidumbre en la demanda y consecuentemente un mayor nerviosismo tipo II.

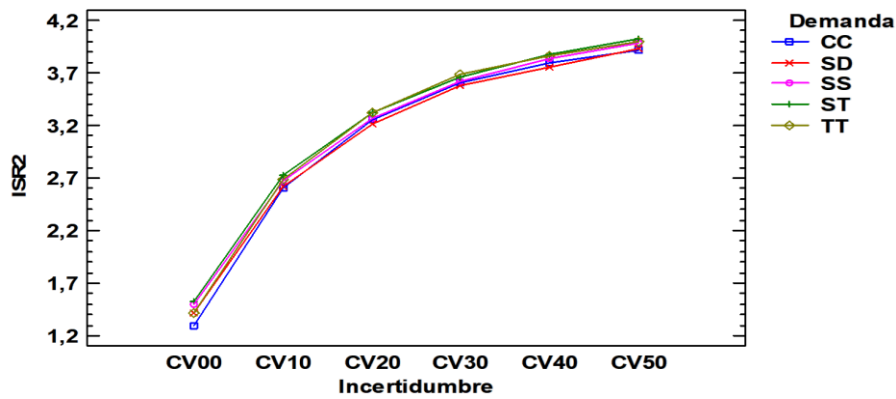
Figura 6-35: Interacciones entre tipo de demanda y factor de Pareto sobre ISR* y 95% del Fisher LSD (Coronado-Hernández, 2016)



*ISR** afín al *ISR2*. Fuente: Extraído del trabajo de Coronado-Hernández (2016).

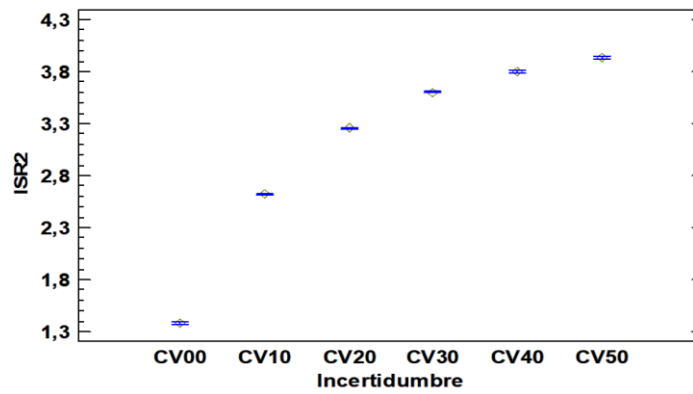
En la Figura 6-36 y Figura 6-37 se observa la relación directa del incremento del nerviosismo tipo II, (*ISR2*), con el incremento de la incertidumbre. La variación de la incertidumbre en la demanda entre (*CV00*) y (*CV10*) tiene efecto directo sobre el nerviosismo tipo II y en el tipo I que se puede apreciar en la Figura 6-24. Pero, la variación de la incertidumbre entre (*CV40*) y (*CV50*) no tiene los efectos tan acusados en el nerviosismo tipo I y II (curva logarítmica base mayor de 1). Sin embargo, la variación de la incertidumbre tienen una relación directa con el incremento de los costes totales en todos sus niveles, como se puede apreciar en la Figura 6-13. En el trabajo de Coronado-Hernández (2016) se aprecian resultados afines a los observados en este trabajo, con el incremento del nerviosismo respecto del factor de incertidumbre (CV), como se puede observar entre la Figura 6-38 y la Figura 6-36.

Figura 6-36: Interacciones entre tipo de demanda y la incertidumbre sobre ISR2 y 95% de Fisher LSD



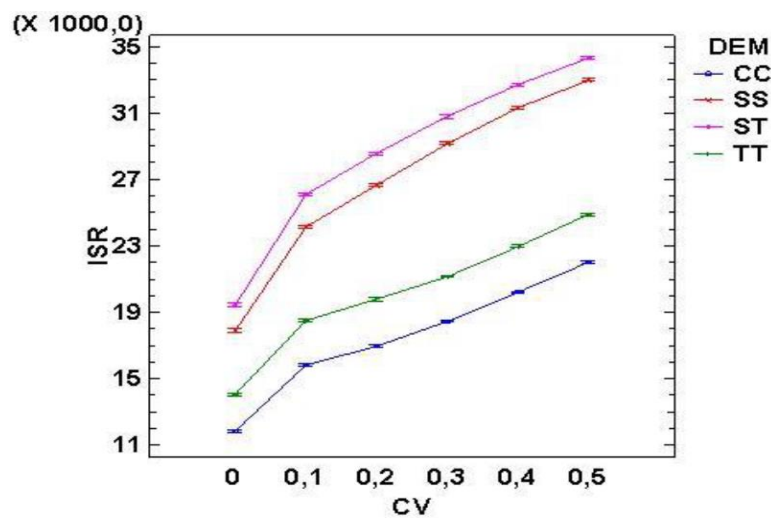
Fuente: Elaboración propia con el programa Statgraphics Centurion XVII.

Figura 6-37: Gráfico de medianas de niveles del factor incertidumbre respecto ISR2 con intervalos del 95% de confianza.



Fuente: Elaboración propia con el programa Statgraphics Centurion XVII.

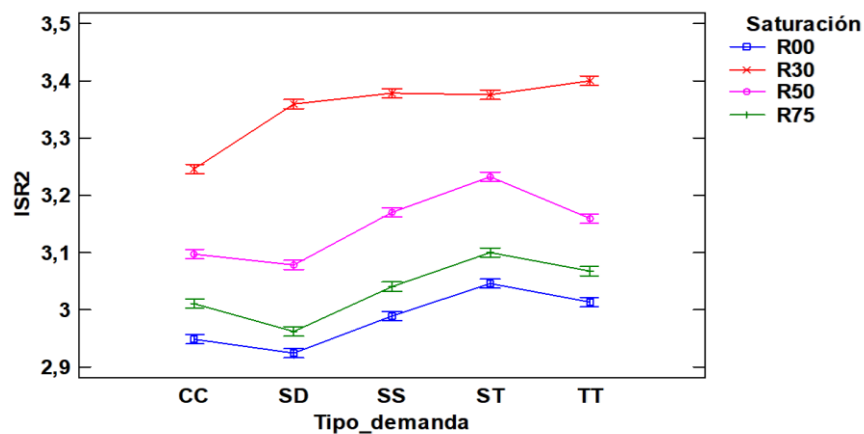
Figura 6-38: Interacciones entre tipo de demanda y nivel de incertidumbre sobre ISR y 95% del Fisher LSD (Coronado-Hernández, 2016)



ISR* afín al ISR2. Fuente: Extraído del trabajo de Coronado-Hernández (2016).

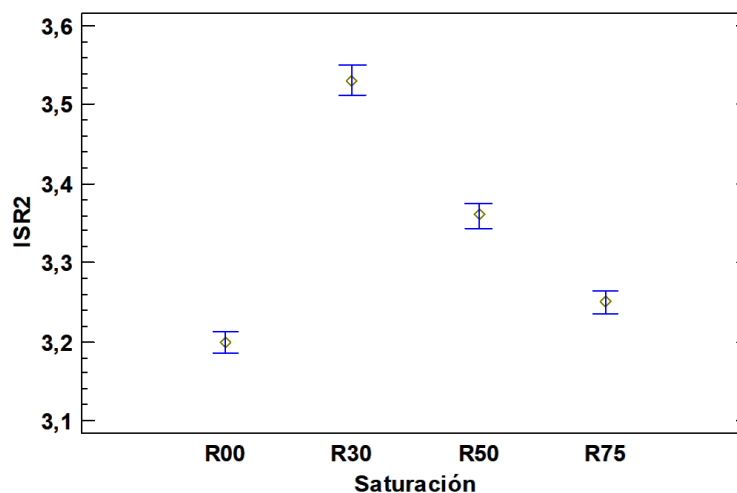
En la Figura 6-39 y la Figura 6-40 se puede observar la influencia de la saturación de la capacidad disponible de todos los recursos con respecto al nerviosismo tipo II. Para niveles de capacidad disponible del 30% (R30) es cuando se producen los niveles más altos de nerviosismo tipo II, mayores cambios en la cantidad de *strokes* programados por la falta de capacidad para satisfacer todos los requerimientos. Pero, a pesar de esta falta de capacidad, esta situación no tiene efectos apreciables en el nerviosismo tipo I, como se puede apreciar en la Figura 6-25. Por otra parte, se aprecian diferencias estadísticamente significativas con una confianza del 95% entre la disposición del 100% de la capacidad (R00) y la disponibilidad del 75% (R75) en el nerviosismo tipo II, aunque variaciones significativas en el coste total no se destacaron en la Figura 6-18. Esta reducción del 25% todavía deja niveles suficientes de capacidad disponible para poder satisfacer las demandas solicitadas. Pero requiere cambios en las cantidades de operaciones planificadas entre los diferentes tramos en los que se planifica. Estas reprogramaciones implican un incremento del nerviosismo tipo II.

Figura 6-39: Interacciones entre tipo de demanda y la saturación sobre ISR2 y 95% de Fisher LSD.



Fuente: Elaboración propia con el programa Statgraphics Centurion XVII.

Figura 6-40: Gráfico de medianas de niveles del factor saturación respecto ISR2 con intervalos del 95% de confianza.



Fuente: Elaboración propia con el programa Statgraphics Centurion XVII.

A partir del análisis del nerviosismo tipo II, se puede afirmar que en entornos con estructuras de productos con menos niveles ($P1$) o con alternativas ($P6$), los cambios en la planificación son más frecuentes. Por lo tanto, estas estructuras también presentan cambios en las cantidades de *strokes* planificados, que afectan a niveles más altos de nerviosismo tipo I y tipo II. El modelo utilizado no penaliza el nerviosismo en su función objetivo y las pequeñas variaciones de un periodo de planificación a otro conllevan fácilmente a cambios en la planificación de este tipo de productos. Por otro lado, los productos complejos, con varios niveles de subproductos ($P5$), presentan cambios en la cantidad de *strokes* planificados en cada periodo, pero no en el lanzamiento o la preparación de las operaciones. Por lo tanto, los productos tipo ($P5$) presentan altos niveles de nerviosismo tipo II, pero bajos de tipo I.

La incertidumbre tiene una mayor incidencia en los primeros rangos de los niveles del factor con respecto al nerviosismo tipo I y tipo II pese a que su influencia en los costes totales sea de proporcionalidad constante.

En cuanto a los tipos de demanda, se aprecia el incremento del nerviosismo tipo II con el incremento de la demanda (ST y TT), a pesar de que el indicador incluye en el denominador el número de operaciones realizadas. Este hecho se explica por el incremento en la incertidumbre, ya que es proporcional al aumento de la demanda que tiene un efecto directo sobre el nerviosismo tipo II. El nerviosismo tipo I aumenta con la estabilidad en la demanda reduciéndose con las demandas estacionales.

Los primeros niveles del factor de saturación ($R00$ y $R75$) no tienen diferencias significativas en las medianas de los costes totales, pero si provocan un incremento significativo en el nerviosismo tipo II. La reducción de la capacidad disponible en un 25% ($R75$) no impide cumplir con los requerimientos de la demanda, pero a costa de mayores cambios en el número de operaciones que deben realizarse entre diferentes tramos en los que se planifica. Por el contrario, la variación de la capacidad disponible no tiene efectos significativos sobre el nerviosismo tipo I. La decisión de iniciar o no las operaciones no está sujeta a la capacidad disponible. Pero la capacidad disponible influye en la cantidad de operaciones que se realizan con dicho arranque, en estas instancias.

En el trabajo de Omar & Bennell (2009) se destaca que cuando hay mayor igualdad entre los costes de operaciones y los de preparación, alternativas equivalentes, se producen los niveles más altos de inestabilidad en el sistema. Este capítulo complementa ese trabajo, con que cuando se necesitan más periodos para la realización de las distintas operaciones de un producto o servicio, el nerviosismo tipo I disminuye, pero el nerviosismo tipo II aumenta.

6.8 Análisis del comportamiento del nivel de servicio de las propuestas de planificación obtenidas

En este apartado se presenta el comportamiento del nivel de servicio en la cadena de suministro por los distintos efectos de los factores y niveles de estudio. Para medir el nivel de servicio, en

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

este apartado, se utiliza la Ecuación (6.9), que evalúa el nivel de la demanda final insatisfecha en función de la demanda solicitada en los 52 periodos de estudio.

En la Tabla 6-8 se puede observar el análisis de la varianza de los niveles de servicio (*NSR*) y las contribuciones de cada factor, eliminando los efectos de los demás factores. Se destaca el peso que tiene la saturación y la incertidumbre sobre el nivel de servicio por los valores de “Razón-F”. Comparando los valores obtenidos con los resultados del trabajo de Coronado-Hernández (2016), se puede observar que después del factor de saturación, un elemento no incluido en su análisis, se encuentra igualmente la incertidumbre como factor con mayor impacto en el nivel de servicio.

Tabla 6-8: Análisis de la varianza para NSR - Suma de Cuadrados Tipo III.

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Pareto	0,181	5	0,036	149	0,0000
B:Tipo_demanda	5,908	4	1,477	6.085	0,0000
C:Incertidumbre	26,348	5	5,269	21.712	0,0000
D:BOM	11,172	5	2,234	9.206	0,0000
E:Saturación	40,731	3	13,577	55.940	0,0000
INTERACCIONES					
AB	0,193	20	0,009	39	0,0000
AC	0,025	25	0,001	4	0,0000
AD	0,040	25	0,001	6	0,0000
AE	0,081	15	0,005	22	0,0000
BC	0,707	20	0,035	145	0,0000
BD	1,129	20	0,056	232	0,0000
BE	16,436	12	1,369	5.643	0,0000
CD	0,844	25	0,033	139	0,0000
CE	0,165	15	0,011	45	0,0000
DE	6,409	15	0,427	1.760	0,0000
RESIDUOS	12,529	51.625	0,0002		
TOTAL (CORREGIDO)	122,905	51.839			

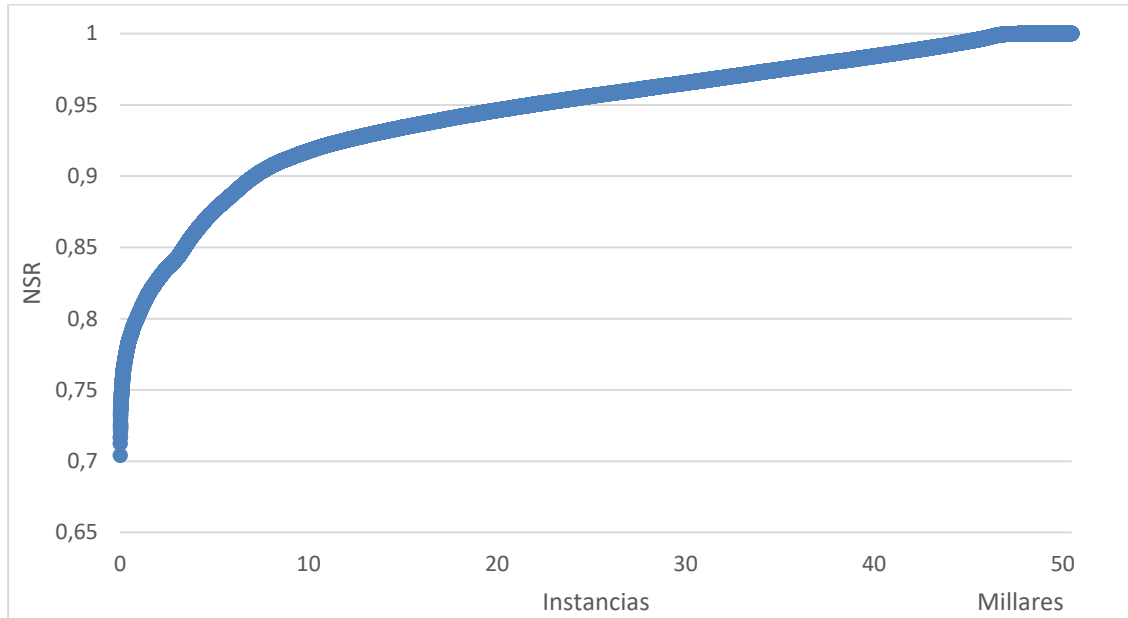
Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual, *GI* grados de libertad del factor. Fuente: Elaboración propia con el programa Statgraphics Centurion XVII.

Del trabajo de Coronado-Hernández (2016) se puede observar que los niveles de servicio medios toman valores que van desde 0,27 a 1 en la Figura 6-51. En la Figura 6-41 se presentan los valores que toman los niveles de servicio en este trabajo y se puede observar que los valores van desde 0,7 a 1. Se entiende que esta diferencia entre los dos trabajos se produce por el efecto de la ponderación de la estructura de costes en función de la lejanía a la toma de decisiones, propuesta en la Tabla 5-2. Los periodos más cercanos al periodo donde se realiza la planificación de operaciones, presentan mayores costes que los periodos lejanos. Estas diferencias de resultados son apreciables en los rangos de los niveles de servicio entre ambos trabajos, pero no es destacable entre los rangos que toman los valores de los costes totales de ambos trabajos. En el trabajo de Omar & Bennell (2009) no se analiza el nivel de servicio.

En la Figura 6-42 se pueden identificar, a partir de una instancia, la importancia relativa de los distintos elementos de la función objetivo, para la instancia Par00_ST_CV10_P1_R00_1. En ella se destaca el peso predominante de los costes de preparación de lote y los costes por demora, pero que en ningún caso se generan niveles de servicio inferiores al 92%. Por lo que se identifica,

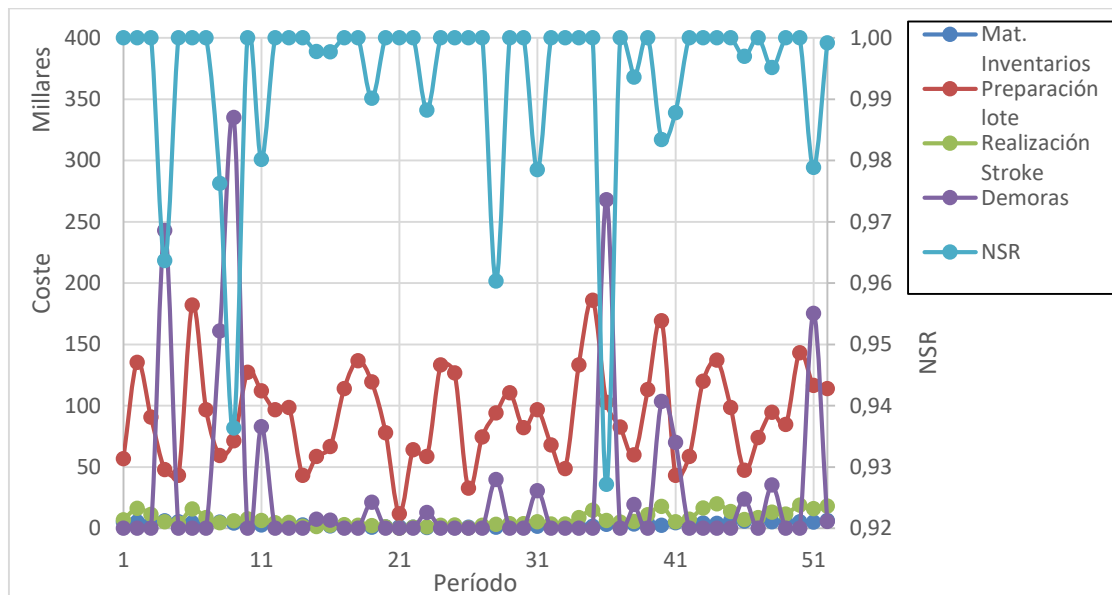
como una oportunidad para futuras líneas de investigación, analizar las consecuencias provocadas por las variaciones en las ponderaciones de la Tabla 5-2.

Figura 6-41: Distribución de los valores de NSR.



Fuente: Elaboración propia.

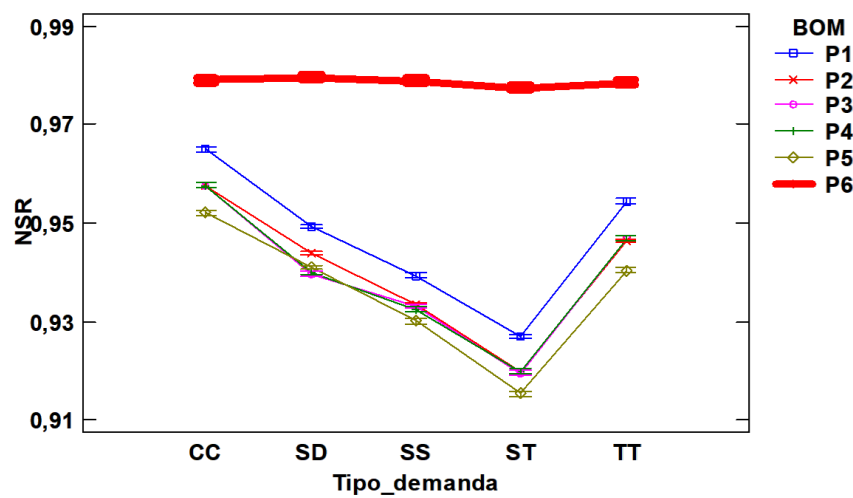
Figura 6-42: Descomposición de costes y nivel de servicio.



Mat. Inventarios coste del mantenimiento del inventario en cada periodo, *Preparación lote* coste de las preparaciones de los lotes, *Realización Stroke* coste de la ejecución de los strokes, *Demoras* coste de las demoras, *NSR* nivel de servicio medio en dicho periodo de los 10 productos finales. Fuente: Elaboración propia de la instancia Par00_ST_CV10_P1_R00_1

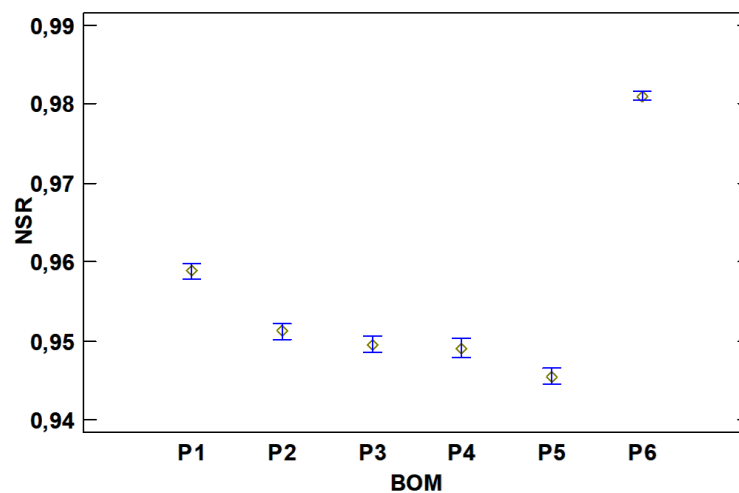
En la Figura 6-43 y la Figura 6-44 se puede observar cómo la complejidad del producto (BOM) afecta al nivel de servicio (NSR). La distribución del nivel de servicio (NSR) en cada uno de los tipos de producto se puede observar en la Figura 6-44, destacándose los peores niveles de servicio con las estructuras tipo (P5) frente a las estructuras con alternativas de operaciones (P6) y estructuras más simples como (P1). Equivalentes observaciones se encuentran en el trabajo de Coronado-Hernández (2016) con respecto a las estructuras de producto (P1) y (P5) que se pueden apreciar en la Figura 6-45 y en la Figura 6-51. La estructura de producto (P6), introducida en este trabajo, permite acercarse a un nivel de servicio cercano a la unidad y es capaz de dar niveles de servicio altos independientemente del tipo de demanda a la que esté sometida.

Figura 6-43: Interacciones entre tipo de demanda y estructura de producto sobre NSR y 95% de Fisher LSD.



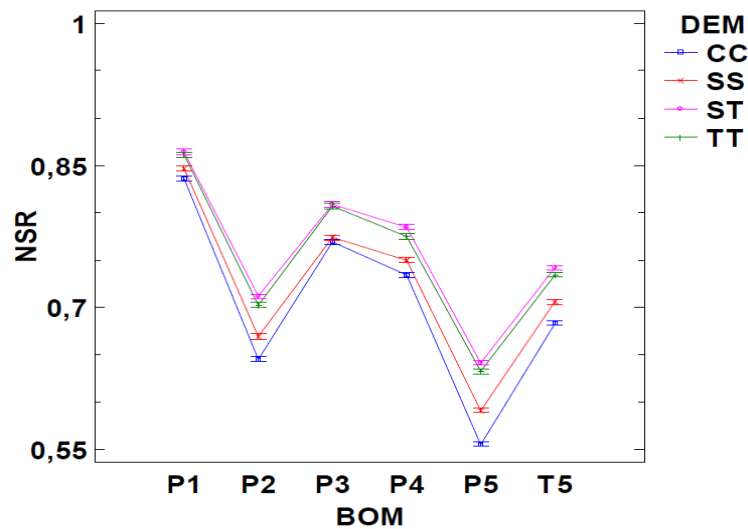
Fuente: Elaboración propia con el programa Statgraphics Centurion XVII.

Figura 6-44: Gráfico de medianas del factor tipo de producto respecto NSR con intervalos del 95% de confianza.



Fuente: Elaboración propia con el programa Statgraphics Centurion XVII.

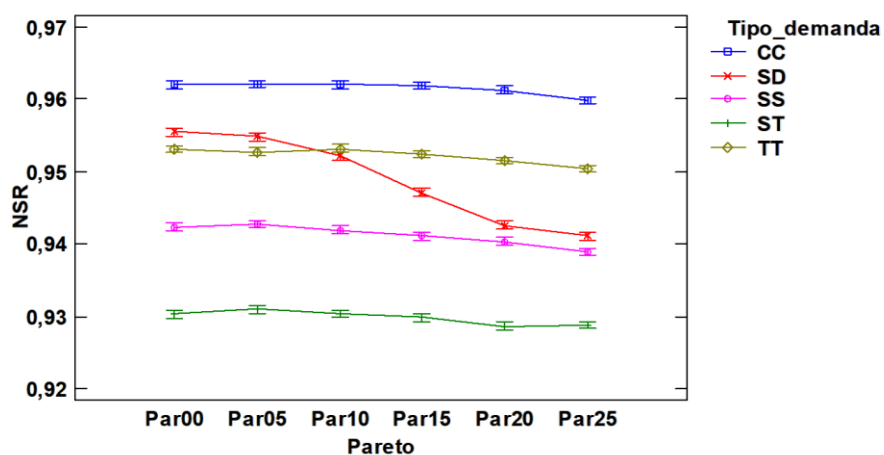
Figura 6-45: Interacciones entre el tipo de producto y tipo de demanda sobre NSR y 95% del Fisher LSD (Coronado-Hernández, 2016)



NSR nivel de servicio, BOM estructura de producto, DEM tipo de demanda. Fuente: Extraído del trabajo de Coronado-Hernández (2016).

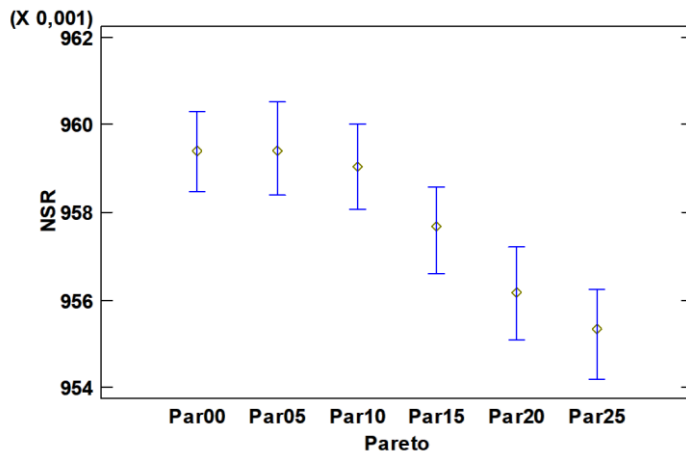
En la Figura 6-46 y la Figura 6-47 se observa que el reparto de la demanda entre los productos que aporta el factor de Pareto tiene una baja influencia en el nivel de servicio, con peores niveles de servicio a niveles altos del factor de distribución irregular de la demanda. El patrón de la demanda estacional decreciente (SD) tiene un comportamiento diferenciado con respecto al resto de los tipos de demandas con respecto al factor de Pareto, ya que el nivel de servicio empeora más rápidamente con el aumento del factor de Pareto. Este comportamiento desigual se entiende, dado que la estacionalidad de la demanda en niveles altos del factor de Pareto se acentúa en un solo producto y que las demandas de tipo estacional presentan niveles de servicio peores.

Figura 6-46: Interacciones entre factor de Pareto y tipo de demanda sobre NSR y 95% de Fisher LSD



Fuente: Elaboración propia con el programa Statgraphics Centurion XVII.

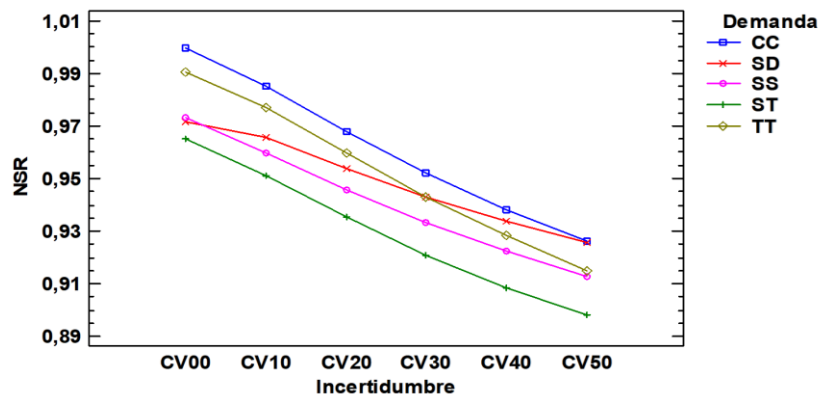
Figura 6-47: Gráfico de medianas de niveles del factor Pareto respecto NSR con intervalos del 95% de confianza.



Fuente: Elaboración propia con el programa Statgraphics Centurion XVII.

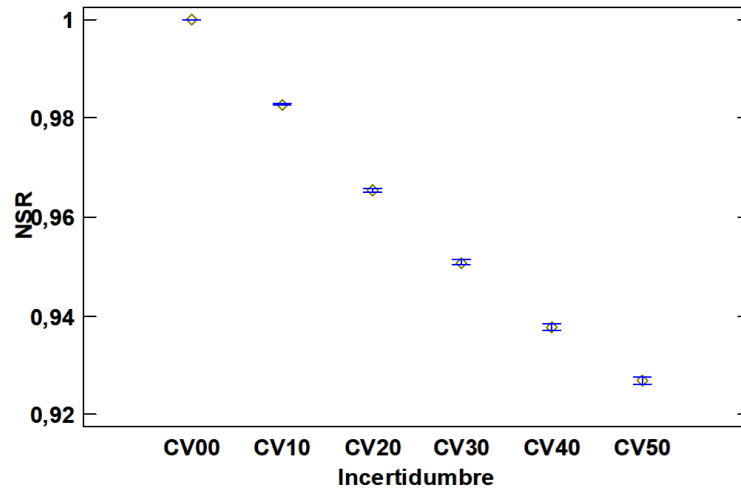
En la Figura 6-48 y la Figura 6-49 se puede observar cómo la incertidumbre afecta de forma significativa al nivel de servicio. En ausencia de incertidumbre en la demanda, hay un mejor nivel de servicio independientemente del patrón de demanda. Pero a medida que aumentan los niveles de incertidumbre, los niveles de servicio comienzan a empeorar siguiendo una curva de proporcionalidad constante que se puede apreciar en la Figura 6-49. Es de destacar que la demanda estacional decreciente (SD) tiene un comportamiento diferente al resto de tipos de demandas. Con el tipo de demanda estacional decreciente, el nivel de servicio empeora menos con respecto al incremento de la incertidumbre que con el resto de los tipos de demandas. Esto se debe al hecho de que, a demandas menores, presentes en demandas decrecientes, el efecto de la incertidumbre es menos importante. Hay que recordar que el factor de incertidumbre en la demanda se ha definido en este trabajo como una función de variación aleatoria normal centrada en la demanda de cada periodo, definida con la Ecuación (5.2). Se encuentran equivalentes resultados en el trabajo de Coronado-Hernández (2016) que se pueden apreciar en la Figura 6-50 y en la Figura 6-51.

Figura 6-48: Interacciones entre tipo de demanda y la incertidumbre sobre NSR y 95% de Fisher LSD.



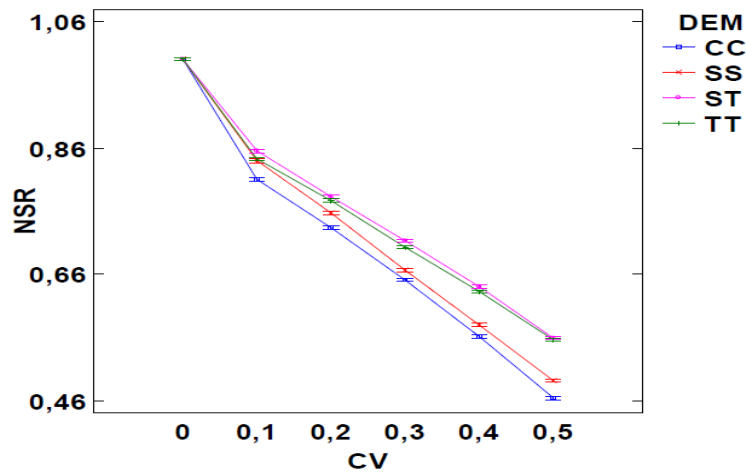
Fuente: Elaboración propia con el programa Statgraphics Centurion XVII.

Figura 6-49: Gráfico de medianas de niveles de incertidumbre respecto NSR con intervalos del 95% de confianza.



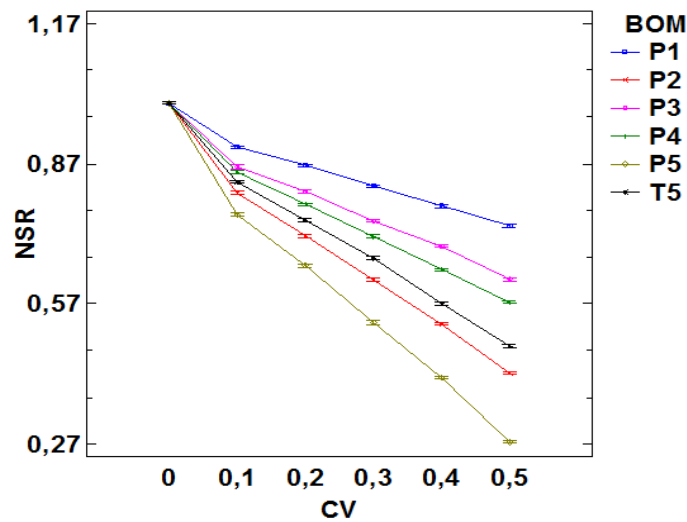
Fuente: Elaboración propia con el programa Statgraphics Centurion XVII.

Figura 6-50: Interacciones entre nivel de incertidumbre y tipo de demanda sobre NSR y 95% del Fisher LSD (Coronado-Hernández, 2016)



NSR nivel de servicio, CV incertidumbre en la demanda, DEM tipo de demanda. Fuente: Extraído del trabajo de Coronado-Hernández (2016).

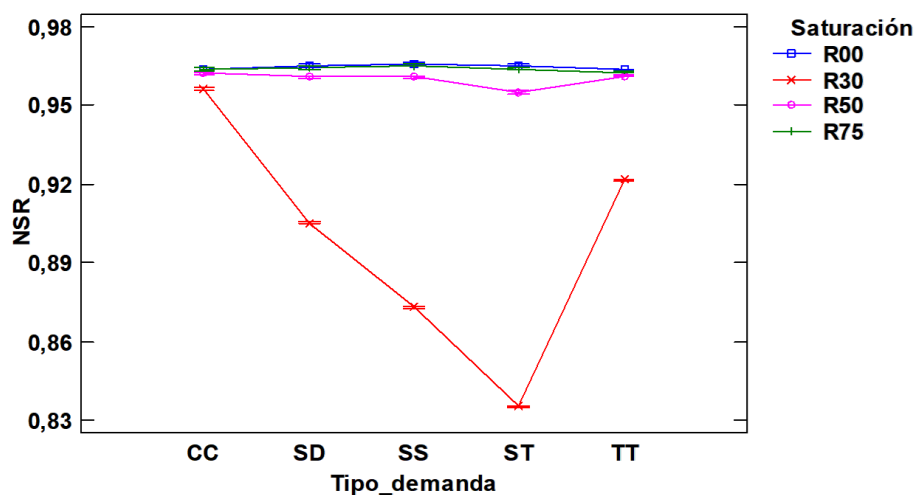
Figura 6-51: Interacciones entre nivel de incertidumbre y tipo de producto sobre NSR y 95% del Fisher LSD (Coronado-Hernández, 2016)



NSR nivel de servicio, CV incertidumbre en la demanda, DEM tipo de demanda. Fuente: Extraído del trabajo de Coronado-Hernández (2016).

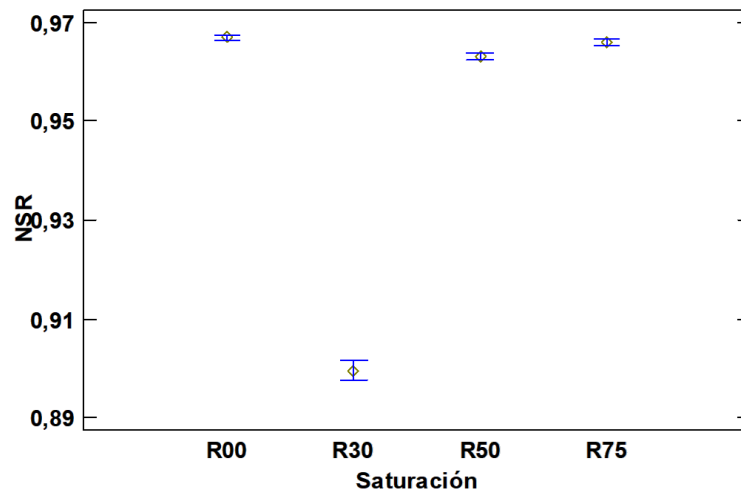
En la Figura 6-52 y la Figura 6-53 se puede observar cómo el factor de saturación afecta al nivel de servicio (NSR). De estos, destaca la diferencia estadísticamente significativa de tener solo el 30% (R30) de la capacidad de todos los recursos al generar los peores niveles de servicio. Una distribución equivalente de los efectos del factor de la capacidad disponible se encuentra en los costes totales que se han podido observar en la Figura 6-18. No se han encontrado diferencias significativas en los primeros niveles del factor de capacidad disponible, R00 y R75, tanto en los costes totales como en los niveles de servicio.

Figura 6-52: Interacciones entre tipo de demanda y la saturación sobre NSR y 95% de Fisher LSD.



Fuente: Elaboración propia con el programa Statgraphics Centurion XVII.

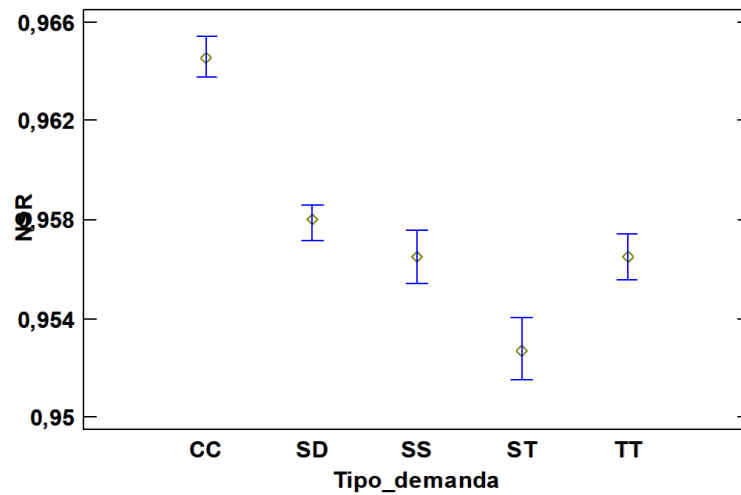
Figura 6-53: Gráfico de medianas de niveles del factor saturación respecto NSR con intervalos del 95% de confianza.



Fuente: Elaboración propia con el programa Statgraphics Centurion XVII.

Con respecto a los tipos de demanda, se observan en la Figura 6-54 y Figura 6-48 que el nivel de servicio empeora con las demandas mayores, tanto las demandas estacionales (*SD*), (*SS*) y (*ST*) como con las demandas crecientes (*TT*). Con respecto al patrón de la demanda estacional decreciente (*SD*), se observa que tiene un comportamiento diferenciado con respecto al resto de tipos de demandas, ya que el nivel de servicio empeora más rápidamente con el incremento de la distribución de Pareto que se puede apreciar en la Figura 6-46. El nivel de servicio empeora menos con el incremento de la incertidumbre como se puede apreciar en la Figura 6-48. Este comportamiento del tipo de demanda estacional decreciente se explica por su composición. Por un lado, la existencia de la estacionalidad que conlleva peores niveles de servicio por la falta de capacidad para hacer frente a las variaciones en la demanda. Por otro lado, el decrecimiento de la demanda que conlleva un mejor nivel de servicio al poder asegurar mejor los requerimientos de la demanda con la capacidad de los recursos y stocks disponibles.

Figura 6-54: Gráfico de medianas de opciones del factor tipo de demanda respecto NSR con intervalos del 95% de confianza



Fuente: Elaboración propia con el programa Statgraphics Centurion XVII.

Con respecto al análisis del nivel de servicio, se puede afirmar que en entornos con estructuras de producto con menos niveles ($P1$), que se realizan en un solo periodo las operaciones de los productos finales, o con alternativas ($P6$) son más frecuentes los cambios en la planificación. Los niveles de nerviosismo tipo I y II, en estas estructuras, son mayores. Pero en esas mismas estructuras de producto, los niveles de servicio son mejores y los costes totales son menores. Los sistemas son capaces de adaptarse mejor a los requerimientos de la demanda a menor coste en estas estructuras de producto ($P1$) y ($P6$). Por otro lado, productos complejos, con varios niveles de subproductos ($P5$), presentan peores niveles de servicio, de costes totales y de nerviosismo tipo II. Pero presentan mejores resultados de nerviosismo tipo I. Estos productos requieren de mayor número de periodos de previsión en la demanda para la programación de sus operaciones, por lo que tienen mayor estabilidad en cuando arrancar o no, pero tienen que soportar las variaciones en la demanda de más periodos, provocando mayores cambios en las cantidades de operaciones a ejecutar, mayores costes y mayores incumplimientos de servicio. La estructura de producto ($P6$), con alternativas, permite acercarse a un nivel de servicio cercano a la unidad con unos costes totales menores.

Respecto del factor de Pareto, se observa que a medida que aumenta la diferencia de demandas entre los productos se presentan peores niveles de servicio y mayores costes totales.

El nivel de servicio, al igual que se encontró en los costes totales, presenta una evolución de proporcionalidad constante con la incertidumbre, tal que al incrementarse la incertidumbre empeora el nivel de servicio y los costes totales. Aunque la incertidumbre hace empeorar más el nerviosismo tipo I y el tipo II entre los primeros niveles del factor y menos entre los niveles finales del factor.

Los peores niveles de servicio respecto del tipo de demanda se encuentran en las demandas estacionales y demandas crecientes. Por otro lado, se destaca un comportamiento desigual en

el patrón de la demanda estacional decreciente (*SD*) con respecto al resto de tipos de demandas al variar el factor de Pareto o la incertidumbre. El nivel de servicio de la demanda estacional decreciente empeora más que el resto de tipos de demandas al incrementarse el factor de Pareto y empeora menos que el resto de tipos de demandas al incrementarse el factor de la incertidumbre.

Por último, la mayor reducción de capacidad disponible (*R30*) del factor de saturación conlleva un empeoramiento del nivel de servicio y mayores costes totales, acrecentado cuando los patrones del tipo de demanda son de mayores demandas, como en la demanda estacional creciente (*ST*). Todo ello debido a la incapacidad de satisfacer dichos requerimientos de la demanda.

6.9 Conclusiones y futuros trabajos

La planificación mediante el procedimiento de horizontes rodantes es habitual en la industria (Sahin et al., 2013), igualmente en la investigación académica como herramienta para poder solucionar grandes problemas de programación matemática, tal que permite simplificarlos, reducirlos a tamaños asequibles a la capacidad computacionales disponible o trabajar solo con aquellos datos disponibles o de mayor confianza. La disposición de un banco importante de instancias permite futuras investigaciones, dado que el comportamiento de esta heurística en situaciones estocásticas no está tan desarrollado (DeYong et al., 2016; Sahin et al., 2013). En el siguiente capítulo será utilizado el banco de instancias para el objetivo de la tesis, el estudio de la coordinación distribuida en la formulación GMOP.

Las consecuencias de los factores independientes analizados han sido evaluadas mediante los medibles de los costes totales de los 52 periodos en estudio ejecutados, las inestabilidades en la planificación nerviosismo tipo I, referida a la ejecución o no de las órdenes, como la inestabilidad en la planificación nerviosismo tipo II, referida a la cantidad ejecutada y, por último, la capacidad de la cadena de suministro en satisfacer la demanda en cada periodo y producto. El programa comercial Statgraphics Centurion XVII© ha permitido la representación gráfica de los distintos resultados de forma segregada, permitiendo visualizar las distintas consecuencias de los distintos factores y sus niveles.

De dicho análisis se ha podido concluir lo siguiente:

- En entornos con patrones de la demanda estacional y creciente se presentan los mayores costes.
- Se destaca un comportamiento desigual en el tipo de demanda estacional decreciente (*SD*) con respecto al resto de tipos de demanda y los factores de Pareto y de incertidumbre. El tipo de demanda estacional decreciente presenta un mayor empeoramiento del nivel de servicio con el aumento del factor de Pareto y un menor empeoramiento del nivel de servicio con el incremento de la incertidumbre. Estos efectos son producidos por su doble componente de estacionalidad y demanda decreciente.

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

- El factor de tipo de producto con más niveles, tipo (P5), tiene los costes totales mayores y peores niveles de servicio. Además, presentan cambios en la cantidad de *strokes* planificados en cada periodo entre tramos de planificación, pero no en el lanzamiento o preparación de las operaciones. Por lo tanto, los productos tipo (P5) presentan elevados niveles de nerviosismo tipo II, pero bajos de tipo I.

- Las estructuras de productos con menos niveles (P1), que se realizan en un solo periodo las operaciones de los productos finales, o con alternativas (P6) son más frecuentes los cambios en la planificación. Por lo tanto, son también los cambios en las cantidades de *strokes* entre tramos de planificación, afectando a mayores niveles de nerviosismo tipo I y tipo II. Pero estas estructuras de producto conllevan mejores niveles de servicio y menores costes totales. Las estructuras de producto (P6) permiten acercarse a un nivel de servicio cercano a la unidad.

- La incertidumbre en la demanda tiene una relación directa y proporcionalidad constante con el incremento de costes totales y peores niveles de servicio. Encontrando en estos casos mayores penalizaciones por retrasos en el servicio dada la falta de stocks disponibles de subproductos o capacidad para satisfacer estas variaciones o incrementos en la demanda. Los mayores niveles de incertidumbre en la demanda (CV50) genera mayores niveles de nerviosismo tipo I y II. El nerviosismo tipo I y el nerviosismo tipo II presentan una mayor variación entre los primeros niveles del factor de la incertidumbre (CV00, CV10) que entre los últimos niveles analizados (CV40 y CV50).

- Una mayor distribución irregular de la demanda genera mayores costes en el sistema y peores niveles de servicio, pero mejores niveles de nerviosismo tipo I.

- Omar & Bennell (2009) concluyen que cuanto menores son los costes de las operaciones y los costes de las preparaciones se producen los niveles más altos de inestabilidad en el sistema. En estas condiciones se presentan las menores penalizaciones a realizar cambios. Además, afirman que los costes unitarios tienen mayor importancia en esta inestabilidad del sistema. Este trabajo añade que cuando son necesarios más periodos para la realización de las distintas operaciones de un producto, el nerviosismo tipo I disminuye, pero el nerviosismo tipo II aumenta.

- La reducción de la capacidad disponible de los recursos, factor de saturación, genera más retrasos debido a la capacidad insuficiente para satisfacer las demandas, causando un aumento en los costes totales. Además, esta saturación conduce a niveles más altos de nerviosismo tipo II y peores niveles de servicio, que aumentan cuando los patrones de la demanda son estacionales y con demandas crecientes. El factor de saturación no presenta efectos significativos en el nerviosismo tipo I.

- Los niveles menores de reducción de la capacidad disponible (R00 y R75), factor de saturación, no tienen diferencias significativas en los costes totales o en el nivel de servicio, pero si respecto del nerviosismo tipo II. La reducción de capacidad disponible de los recursos es compensada con mayores cambios en las cantidades de *strokes* a procesar, pero mantienen los niveles de costes totales y niveles de servicio.

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

- La ponderación de la estructura de costes, que varía en función de la cercanía temporal a la planificación de las operaciones, propuesta en la Tabla 5-2, genera una mejora significativa en los niveles de servicio en comparación con el trabajo de Coronado-Hernández (2016). En dicho trabajo los costes son independientes de la cercanía temporal al momento de la planificación de las operaciones.

En este capítulo se han analizado las consecuencias de los distintos factores independientes introducidos en el banco de instancias. Se reserva para futuros trabajos el análisis de las variables de diseño del procedimiento de horizontes rodantes (PH, FI, RP, reglas de generación de lotes). Al mismo tiempo se reserva para futuros trabajos, el análisis de las consecuencias de los niveles de ponderación temporal de las estructuras de costes en función de la lejanía a la toma de decisión, que se ha introducido en este banco de instancias. También, el análisis a partir de otros medibles diferentes, como la inestabilidad entre más tramos de planificación para cada periodo, ponderada por los periodos analizados o por la totalidad de operaciones a realizar en cada tramo de planificación.

Capítulo 7: Planificación de operaciones distribuidas con un recurso crítico compartido y coordinado con la relajación Lagrangiana con el procedimiento de horizontes rodantes⁶

7.1 Introducción

Los diferentes actores de la CdS deberían tomar sus propias decisiones considerando la información relativa a todos los eslabones de la CdS, sean proveedores, proveedores de proveedores o clientes, internos o externos a la organización. La coordinación de las decisiones de todos los eslabones de la CdS se convierte en un punto estratégico en la dirección de operaciones. Esta coordinación se puede lograr utilizando uno de los dos enfoques para la toma de decisiones coordinadas: centralizada o descentralizada con un mecanismo de coordinación (Ogier et al., 2015).

La coordinación en la planificación de las operaciones puede realizarse en un momento determinado o en varios periodos sucesivos. Por otro lado, al incluir varios periodos, pueden aparecer incertidumbre sobre la información futura, en los periodos más distantes. Además, se requiere más capacidad de computación para poder identificar la propuesta de planificación de operaciones más adecuada para cada periodo, al tener que analizar la información de todos los periodos involucrados. El procedimiento de horizontes rodantes es habitual para resolver esta dificultad en la planificación de las operaciones con los modelos multiperiodos (Stadtler, 2000).

De la revisión de la literatura sobre mecanismos de coordinación para la toma de decisiones descentralizada presentada en el tercer capítulo de esta tesis doctoral, se destaca la falta de trabajos que analicen la coordinación cuando se está aplicando el procedimiento de horizontes rodantes. Por otro lado, de la revisión de la literatura sobre horizontes rodantes, se extrae la falta de trabajos de investigación sobre la toma coordinada de decisiones bajo decisores independientes en entorno de horizontes rodantes (Sahin et al., 2013).

En el capítulo cuarto se destaca que la relajación Lagrangiana, al ofrecer una descomposición del modelado de la cadena de suministro en subproblemas vinculados, puede en ciertos casos convertirse en una herramienta de coordinación. La relajación Lagrangiana permite eliminar restricciones del modelado incorporándolas a la función objetivo. Estas restricciones eliminadas

⁶ Una versión previa de este capítulo fue presentada en *29th European Conference on Operational Research (EURO 2018)* celebrada en Valencia, España, Julio 8-11, 2018. Ha servido para la realización del artículo científico "*Capacity sharing in production networks: a dynamic and distributed production planning approach based on Lagrangian relaxation*", remitido a la revista "*The European Journal of Operational Research (EJOR)*".

permiten descomponer el modelo relajado en submodelos relacionados. Estas descomposiciones permiten en ciertos casos segregar el modelado en su totalidad y en otros casos segregar el modelado parcialmente. Estos subproblemas pueden coordinarse a través de las partes no descompuestas (Kong et al., 2014), según lo propuesto por Dantzig-Wolfe (1960), la propuesta de Benders (1962) u otras. En el caso de que el modelo sea descompuesto en su totalidad, la coordinación entre los subproblemas se puede hacer con el procedimiento propuesto por Singh et al. (2016) de “*secure multiparty computations procedure*”. Estos subproblemas pueden coordinarse con la elección adecuada de los multiplicadores de Lagrange, presentes en los subproblemas al aplicar la relajación Lagrangiana.

Una propuesta para el cálculo adecuado de los multiplicadores de Lagrange se encuentra con el método del subgradiente recogido por Fisher (2004) y analizado en el cuarto capítulo de esta tesis. En el análisis se destaca que el método del subgradiente recogido por Fisher (2004) ofrece una convergencia en los multiplicadores de Lagrange con el número de iteraciones. Se puede observar en la Figura 4-6 como los multiplicadores de Lagrange convergen a unos valores en las sucesivas iteraciones del cálculo de los multiplicadores.

La modelización de la cadena de suministro MLCLSP (Multilevel, capacitated, lot-sizing problem) se va a realizar con la versátil formulación *Planificación de Operaciones y Materiales Genéricos (GMOP)* (García-Sabater et al., 2013). El modelo utiliza *strokes* para representar a las operaciones. GMOP permite gestionar conjuntamente la lista de materiales (BOM) y la lista de procesos (BOP). La formulación GMOP requiere la centralización de la información para el cálculo de la planificación de operaciones de varias entidades que se desean coordinar. Esta centralización de la información requiere que las entidades compartan su información, por lo que puede generar ciertas reticencias por parte de las entidades. Se proponen dos procedimientos para calcular la planificación de operaciones sin compartir toda la información, por una parte, cuando cada entidad calcula su planificación de operaciones por separado sin compartir ninguna información y, por otra parte, cuando la planificación de operaciones es calculada por cada entidad compartiendo solo cierta información.

Para realizar el análisis comparativo entre los diferentes procedimientos en diferentes situaciones, se asume para este capítulo que las instancias del banco de instancias del capítulo quinto recopilan los datos que definen a entidades independientes. Se entiende que las entidades son independientes y pueden planificar sus operaciones de forma aislada. Este proceso de cálculo de la planificación de operaciones en el que cada entidad calcula su planificación sin compartir ninguna información se denomina, en el desarrollo de este capítulo, planificación descentralizada-descoordinada.

Estas entidades tienen, cada una de ellas, capacidad disponible de recursos que se puede compartir. Los recursos compartidos permiten que se realicen una serie de operaciones en todas las entidades, y cuando se comparten, permiten que cada entidad reduzca sus costes totales. Por lo que se entiende, para el desarrollo de este capítulo, como planificación con coordinación centralizada, cuando las entidades ceden toda la información a un tercero independiente para que este genere las propuestas de planificación de operaciones para cada una de las entidades.

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

Este tercero independiente buscará minimizar los costes acumulados de todas las entidades a coordinar y permitirá el uso compartido de los recursos que puedan ser compartidos por cada una de las entidades involucradas.

En este capítulo se entiende como planificación con coordinación distribuida, cuando cada entidad planifica sus operaciones de manera independiente, pero coordina un uso compartido de la capacidad de ciertos recursos compartiendo únicamente cierta información. Esta capacidad se comparte para realizar operaciones o *strokes* de cualquiera de las entidades coordinadas, a fin de minimizar los costes que cada una de ellas tiene por separado.

La principal contribución de este capítulo es presentar la metodología de aplicación del mecanismo de coordinación con el procedimiento de horizontes rodantes mediante la descomposición de Lagrange de la formulación GMOP para la planificación de las operaciones con coordinación distribuida, donde los multiplicadores de Lagrange se actualizan con el método del subgradiente recogido por Fisher (2004). En el capítulo, se realiza un análisis comparativo de tres procedimientos de planificación de las operaciones (centralizada, descentralizada-descoordinada y distribuida) en diferentes situaciones, dentro del banco de instancias presentado en capítulos previos. Según el mejor de nuestros conocimientos, esta es la primera investigación conocida de la integración de los mecanismos de coordinación distribuidos en la planificación de las operaciones con la formulación GMOP.

Aunque este capítulo no pretende analizar un caso real, la situación analizada se puede extrapolar a empresas en clúster, empresas que comparten vehículos de transporte, hornos de procesado por lotes (soldadura, recocidos, vulcanizados...), etcétera. Entidades que deciden compartir la capacidad excedente de sus recursos, sin una situación de poder, con el fin de mejorar sus ingresos mediante el uso de la capacidad cedida o nivel de servicio.

En el capítulo se utiliza la situación de tres entidades, cada una con sus propias demandas, que disponen de recursos con características equivalentes. Estas entidades deciden voluntariamente, sin ninguna prevalencia de poder entre ellas, compartir uno de sus recursos dentro de un entorno multiperiodo, con inestabilidad en la demanda y aplican el procedimiento habitual en la industria de los horizontes rodantes (Araujo et al., 2013). La inestabilidad en la demanda se identifica con las variables introducidas en el capítulo quinto de variaciones conocidas, variaciones posibles como por variaciones desconocidas.

En este capítulo, se propone un comportamiento colaborativo, también conocido como “de equipo” (Stadtler, 2007), donde las entidades comparten información veraz. El comportamiento colaborativo es modificado al final del capítulo planteando ciertos comportamientos oportunistas por una de las entidades. Se entiende en este capítulo por oportunista cuando una de las entidades comparte información que no es del todo veraz. Por ejemplo, una entidad informa de una capacidad inferior a la capacidad de sus recursos que puede ceder a las otras entidades o que rebaja la reducción de costes que logra mediante el uso compartido de la capacidad disponible.

El resto del capítulo está estructurado de la siguiente manera: en primer lugar, se presenta una breve descripción de la descomposición de Lagrange; en segundo lugar se presentan las tres formulaciones utilizadas para el cálculo de la planificación de operaciones con la formulación GMOP; en tercer lugar, se presentan el procedimiento para el cálculo de la planificación con coordinación distribuida; en cuarto lugar, se expone el diseño de experimento utilizado; en quinto lugar se realiza el análisis de los resultados de los experimentos numéricos de la planificación con coordinación centralizada y la planificación descentralizada-descoordinada, para compararla luego con la planificación con coordinación distribuida; posteriormente se analizan distintos efectos oportunistas. El capítulo finaliza con las conclusiones y propuestas de trabajos futuros.

7.2 Breve aproximación a la descomposición de Lagrange

En esta sección se va a introducir primero la descomposición de Lagrange para el problema multientidad; posteriormente se presenta la modelización multientidad con la formulación GMOP; por último, se expone la propuesta del procedimiento para la coordinación de la capacidad compartida, entre distintas entidades como extensión al capítulo previo de la aplicación de la relajación de Lagrange multiproducto, multiproceso, multiperiodo y multirecurso a una sola entidad.

El multiplicador de Lagrange permite eliminar o relajar ciertas restricciones de la formulación a cambio de penalizar su incumplimiento en la función objetivo, logrando una simplificación del problema, tal y como ha sido presentado en el capítulo cuarto. La nueva función objetivo que incluirá las penalizaciones de las restricciones eliminadas, se le denomina problema dual de la función principal (Conejo et al., 2006) o función relajada. El valor óptimo de la función relajada, para un valor dado no negativo del multiplicador de Lagrange, aporta un límite inferior (en las funciones con objetivo de minimizar) al problema principal, dado que simplemente se agrega un término negativo a la función objetivo (Fisher, 1985). La relajación de ciertas restricciones puede permitir generar un modelo dual de mayor facilidad de resolución (Fisher, 2004).

En ciertos problemas, la relajación de Lagrange permite la descomposición de un problema en una serie de subproblemas coordinados. De hecho, al relajar ciertas restricciones, ciertas partes de la función principal y de las restricciones se pueden resolver por separado. Estos subproblemas están vinculados entre sí, por los elementos de la función principal y de las restricciones que no se han descompuesto. Estos elementos no descompuestos son aquellos que relacionan los diferentes subproblemas. Cada subproblema puede entenderse como una entidad independiente (Dantzig et al., 1960), coordinada por una entidad central, con la que comparten cierta información (Mason et al., 2015). Estos elementos no descompuestos, de la función principal y de las restricciones, permiten generar nuevas propuestas para los multiplicadores de Lagrange. Los subproblemas permiten generar propuestas para las variables de decisión a partir de unos valores dados a los multiplicadores de Lagrange. La entidad central, basándose en los valores de las variables de decisión de cada subproblema, actualiza los valores de los multiplicadores de Lagrange que permiten el cumplimiento de las restricciones no

descompuestas y se adaptan mejor a la función objetivo de la entidad central. Este proceso de negociación se repite hasta la estabilización de los valores que adapten las variables de decisión.

La relajación de las restricciones puede generar, en ciertos casos, subproblemas totalmente independientes que únicamente están coordinados por la adecuada selección de los multiplicadores de Lagrange para cumplir con la función objetivo y las restricciones del problema. En estos casos, la descomposición es completa entre los subproblemas, quedando pendiente el método de cómo encontrar el valor más adecuado para los multiplicadores de Lagrange. El método debe permitir que las mejores propuestas de solución a cada subproblema conlleven al mismo tiempo la mejor propuesta de solución al problema global y a la vez se cumpla con las restricciones relajadas. De esta manera, el método consigue la coordinación de los subproblemas.

Los multiplicadores de Lagrange se pueden obtener de diferentes maneras y específicamente mediante el método del subgradiente (Fisher, 2004). Este método requiere compartir la información del valor óptimo de cada subproblema, con la aplicación de las penalizaciones por los incumplimientos de las restricciones relajadas y el óptimo sin aplicar estas penalizaciones. Es decir, las entidades deberán compartir el resultado de su optimización local y la parte que influye respecto del cumplimiento de las restricciones relajadas cada conjunto de valores de los multiplicadores de Lagrange.

En el intercambio de información, se puede establecer la figura de un tercer agente coordinador independiente que recopile toda la información y recalcule los multiplicadores de Lagrange (Kong et al., 2014). Pero, dado que únicamente es necesaria la información agregada de todas las entidades para el cálculo de los nuevos valores de los multiplicadores de Lagrange, también se puede establecer un protocolo de intercambio de información seguro, sin la necesidad del agente coordinador independiente. Por ejemplo, la primera entidad informa a las otras entidades de los valores necesarios añadiendo una cantidad aleatoria. Luego, el resto de entidades agregan sus datos locales a estos datos para generar el acumulado de todas las entidades. Posteriormente, el primer agente substraer la cantidad aleatoria cuando se le devuelven los datos finales de todas las entidades (Singh et al., 2016). Además, la figura del agente coordinador independiente no sería necesaria si la información está disponible al mismo tiempo para todas las entidades. Lu et al. (2012) definen este proceso como toma de decisiones distribuido iterativo.

En ciertos problemas, la solución propuesta para el modelado dual, que tiene ciertas restricciones relajadas, proporciona una solución que no es válida para el modelado principal (Fisher, 2004). Una forma de hacer que las soluciones propuestas a los subproblemas sean válidas en el modelado principal es agregar nuevas restricciones (Bajgiran et al., 2016). Estas nuevas restricciones reducen las posibles opciones de solución, de modo que las soluciones propuestas a los subproblemas cumplen con las restricciones relajadas y la función objetivo. Estas nuevas restricciones añadidas permiten descartar soluciones a los subproblemas que no son válidas globalmente, en el modelado principal. A continuación, se presentan los tres procedimientos que se van a utilizar con la formulación GMOP.

7.3 Procedimientos utilizados para el cálculo de la planificación de operaciones con la formulación GMOP

7.3.1 Planificación de las operaciones descentralizada-descoordinada

En relación con la modelización GMOP, esta permite la representación de procesos paralelos, la descomposición de productos, co-productos (Coronado-Hernández, 2016; Vidal-Carreras et al., 2012), procesos alternativos (Coronado-Hernández et al., 2010, 2017; Maheut, 2013) y otras posibilidades inherentes al uso de *strokes* (Maheut, Garcia-Sabater, & Mula, 2012), de más fácil representación mediante el concepto de los *strokes* que con las estructuras basadas en Gozinto (Maheut, 2013). La lista de índices, parámetros y variables se puede observar en la Tabla 7-1, con penalizaciones por demora en multientidad.

En el GMOP presentado, la función principal tiene el objetivo de minimizar los costes de mantenimiento de los inventarios, las penalizaciones por demoras en el servicio, las preparaciones de los lotes y los costes de las operaciones de cada entidad, según se puede observar en la Ecuación (7.1). Las restricciones de las Ecuaciones (7.2) son el equilibrio de stock y conectan la parte logística (stocks, retrasos y demanda) con las operaciones (consumo de componentes y creación de nuevos productos) de cada entidad. Las restricciones de las Ecuaciones (7.3) definen la limitación de la capacidad de los recursos disponibles en cada entidad y periodo. Las restricciones de las Ecuaciones (7.4) establecen el requisito de preparación del lote cuando se fabrica en el periodo t con el *stroke* k en cada entidad. Finalmente, el conjunto de restricciones de las Ecuaciones (7.5) establecen los requisitos para las variables.

Tabla 7-1: Índices, parámetros y variables usadas en GMOP multientidad.

Índices	
i	Índice de SKU (incluye producto, embalaje y ubicación)
t	Índice de periodos de planificación de 1 a T
r	Índice de recursos
k	Índice de <i>strokes</i>
c	Índice de entidades
j	Índice de iteración de Lagrange
Parámetros	
$D_{i,t,c}$	Demanda del SKU i para el periodo t para la entidad c
$H_{i,t,c}$	Coste de almacenar una unidad de SKU i en el periodo t para la entidad c
$CO_{k,t,c}$	Coste de <i>stroke</i> k en el periodo t para la entidad c
$CS_{k,t,c}$	Coste de preparación del <i>stroke</i> k en el periodo t para la entidad c
$CB_{i,t,c}$	Coste del retraso del SKU i en el periodo t para la entidad c
$SO_{i,k,c}$	Número de unidades del SKU i que genera el <i>stroke</i> k en la entidad c
$SI_{i,k,c}$	Número de unidades del SKU i que consume el <i>stroke</i> k en la entidad c
$LT_{k,c}$	Tiempo de espera del <i>stroke</i> k en la entidad c
$KAP_{r,c}$	Capacidad disponible del recurso r en el periodo t para la entidad c (en unidades de tiempo)
$KAP_{r=1,c}$	Capacidad disponible del recurso 1 en el periodo t para la entidad c (en unidades de tiempo)
$KAP'_{r=1,c}$	Capacidad disponible del recurso 1 con coordinación en el periodo t para la entidad c (en unidades de tiempo)

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

M_c	Número suficientemente grande para la entidad c
$TO_{k,r,c}$	Capacidad del recurso r requerida para realizar una unidad del <i>stroke</i> k en la entidad c (en unidades de tiempo)
$TS_{k,r,c}$	Capacidad del recurso r requerida para la preparación del <i>stroke</i> k en la entidad c (en unidades de tiempo)
Variabes	
$Z_{k,t,c}$	Cantidad de <i>stroke</i> k que se ejecutan en el periodo t en la entidad c
$\delta_{k,t,c}$	=1 si <i>stroke</i> k se realiza en el periodo t (0 en caso contrario) en la entidad c
$f_{i,t,c}$	Cantidad de SKU i en retraso en el periodo t en la entidad c
$x_{k,t,c}$	Nivel de inventario del SKU i de la entidad c disponible al final del periodo t

Fuente: Elaboración propia.

La formulación del GMOP para cada entidad c se establece como:

$$F_c = \min \sum_t \sum_i H_{i,t,c} x_{i,t,c} + \sum_t \sum_k (CS_{k,t,c} \delta_{k,t,c} + CO_{k,t,c} Z_{k,t,c}) + \sum_t \sum_i CB_{i,t,c} f_{i,t,c} \quad (7.1)$$

Sujeta a:

$$x_{i,t,c} = x_{i,t-1,c} - D_{i,t,c} + f_{i,t,c} - f_{i,t-1,c} - \sum_k SI_{i,k,c} Z_{k,t,c} + \sum_k SO_{i,k,c} Z_{k,t-LT_{k,c}}, \forall i, t, c \quad (7.2)$$

$$\sum_k TS_{k,r,c} \delta_{k,t,c} + \sum_k TO_{k,r,c} Z_{k,t,c} \leq KAP_{r,c} \forall r, t, c \quad (7.3)$$

$$Z_{k,t,c} - M_c \delta_{k,t,c} \leq 0, \forall k, t, c \quad (7.4)$$

$$x_{i,t,c} \geq 0; w_{i,t,c} \geq 0, \forall i, t, c; Z_{k,t,c} \in \mathbb{Z}^+; \delta_{k,t,c} \in \{0,1\} \forall k, t, c \quad (7.5)$$

La planificación descentralizada-descoordinada (F^{des}) del conjunto de entidades se calcula con la formulación GMOP con la función objetivo de la Ecuación (7.6) y con las restricciones de las Ecuaciones (7.2), (7.3), (7.4), (7.5).

$$F^{des} = \sum_c F_c \quad (7.6)$$

El cálculo de la planificación de las operaciones descentralizada-descoordinada se puede realizar por cada entidad sin compartir información. Las entidades únicamente deberán informar del valor de la función objetivo si desean calcular el valor de la función objetivo de la propuesta de planificación descentralizada-descoordinada de todas las entidades.

7.3.2 Planificación de las operaciones con coordinación centralizada

Para el desarrollo de este capítulo, se define que solo un recurso de cada entidad es el compartido. Se establece que el primer recurso de las tres entidades independientes es el compartido ($r=1$). Esta selección se puede realizar con otros recursos compartidos o con más recursos, pero por facilidad de representación matemática, se selecciona el primero. Esta limitación deja la posibilidad para futuras líneas de investigación de variar las combinaciones de recursos que pueden compartirse.

La formulación para la planificación con coordinación centralizada (F^{cen}) de las tres entidades tiene la función objetivo de la Ecuación (7.7), con las restricciones de las Ecuaciones (7.2), (7.4) y (7.5) y las restricciones de las Ecuaciones (7.8) y Ecuaciones (7.9).

$$F^{cen} = \min \sum_c \left(\sum_t \sum_i H_{i,t,c} x_{i,t,c} + \sum_t \sum_k (CS_{k,t,c} \delta_{k,t,c} + CO_{k,t,c} z_{k,t,c}) + \sum_t \sum_i CB_{i,t,c} f_{i,t,c} \right) \quad (7.7)$$

$$\sum_c \left(\sum_k TS_{k,r=1,c} \delta_{k,t,c} + \sum_k TO_{k,r=1,c} z_{k,t,c} \right) \leq \sum_c KAP_{r=1,c} \quad \forall t \quad (7.8)$$

$$\sum_k TS_{k,r,c} \delta_{k,t,c} + \sum_k TO_{k,r,c} z_{k,t,c} \leq KAP_{r,c} \quad \forall t, c, r \neq 1 \quad (7.9)$$

La programación matemática de la planificación con coordinación centralizada buscará en la función objetivo definida en la Ecuación (7.7), minimizar el acumulado de las funciones objetivo de todas las entidades. Todas las entidades deberán ceder toda la información para que se puede realizar la planificación de operaciones con coordinación centralizada. Todos los strokes que consuman el recurso compartido tendrán la limitación de la suma de la capacidad del recurso compartido de todas las entidades, asimilándolo a un recurso único.

7.3.3 Planificación de las operaciones con coordinación distribuida. Descomposición de Lagrange en GMOP

En este planteamiento, las restricciones definidas en las Ecuaciones (7.8) son las únicas que relacionan las tres entidades. Por lo tanto, la función para la planificación con la relajación de las restricciones definidas en las Ecuaciones (7.8), se define mediante la Ecuación (7.10), donde se penalizan los incumplimientos con los T multiplicadores de Lagrange. Se establece un multiplicador de Lagrange para cada una de las restricciones de las Ecuaciones (7.8), por lo tanto, un multiplicador de Lagrange para cada uno de los periodos.

$$\begin{aligned}
 F_D^{cen} = \min \sum_c \left(\sum_t \sum_i H_{i,t,c} x_{i,t,c} + \sum_t \sum_k (CS_{k,t,c} \delta_{k,t,c} + CO_{k,t,c} z_{k,t,c}) \right. \\
 \left. + \sum_t \sum_i CB_{i,t,c} f_{i,t,c} \right) + \\
 + \sum_t u_t^j \left(\sum_c \left(\sum_k TS_{k,r=1,c} \delta_{k,t,c} + \sum_k TO_{k,r=1,c} z_{k,t,c} \right) \right. \\
 \left. - \sum_c KAP_{r=1,c} \right)
 \end{aligned} \tag{7.10}$$

El siguiente paso es seleccionar los adecuados multiplicadores de Lagrange que permitan que la resolución de la función objetivo de las entidades con las restricciones relajadas (F_D^{cen}) se aproxime o iguale a la resolución de las funciones objetivo (F^{cen}) de todas las entidades coordinadas. A partir del teorema de dualidad (Conejo et al., 2006) se establece que si existe una solución mínima al problema primal, función objetivo (F^{cen}) de todas las entidades coordinadas, el valor de la función objetivo es igual al valor de la función objetivo del problema dual, formulado a partir de la función objetivo (F_D^{cen}), obtenido a partir de la mejor propuesta para los multiplicadores de Lagrange. La función objetivo del cálculo de la planificación con coordinación distribuida base (F^{dis-B}) es el máximo valor de la función objetivo (F_D^{cen}) obtenida con la mejor propuesta de los multiplicadores de Lagrange definida en la Ecuación (7.11).

$$\begin{aligned}
 F^{dis-B} = \max_{u_t^j} \min \sum_c \left(\sum_t \sum_i H_{i,t,c} x_{i,t,c} \right. \\
 \left. + \sum_t \sum_k (CS_{k,t,c} \delta_{k,t,c} + CO_{k,t,c} z_{k,t,c}) + \sum_t \sum_i CB_{i,t,c} f_{i,t,c} \right) \\
 + \\
 + \sum_t u_t^j \left(\sum_c \left(\sum_k TS_{k,r=1,c} \delta_{k,t,c} + \sum_k TO_{k,r=1,c} z_{k,t,c} \right) \right. \\
 \left. - \sum_c KAP_{r=1,c} \right)
 \end{aligned} \tag{7.11}$$

Ahora, el modelado para la planificación con las restricciones relajadas puede descomponerse en modelos para cada entidad (F_c^{dis-B}) según el conjunto formado por la función objetivo expresada en la Ecuación (7.12), las restricciones de las Ecuaciones (7.13) y manteniéndose las restricciones de las Ecuaciones (7.2), (7.4), (7.5) para cada entidad, coordinados con los multiplicadores de Lagrange. Cada entidad c , con la restricción de la capacidad relajada, podrá encontrar su óptimo local para cada conjunto de valores de los multiplicadores de Lagrange u_t^j .

$$\begin{aligned}
 F_c^{dis_B} = \max_{u_t^j} \min & \sum_t \sum_i H_{i,t,c} x_{i,t,c} + \sum_t \sum_k (CS_{k,t,c} \delta_{k,t,c} + CO_{k,t,c} z_{k,t,c}) \\
 & + \sum_t \sum_i CB_{i,t,c} f_{i,t,c} \\
 & + \sum_t u_t^j \left(\sum_k TS_{k,r=1,c} \delta_{k,t,c} + \sum_k TO_{k,r=1,c} z_{k,t,c} \right. \\
 & \left. - KAP_{r=1,c} \right)
 \end{aligned} \tag{7.12}$$

$$\sum_k TS_{k,r,c} \delta_{k,t,c} + \sum_k TO_{k,r,c} z_{k,t,c} \leq KAP_{r,c} \quad \forall t, c, r \neq 1 \tag{7.13}$$

La función objetivo de la planificación con coordinación distribuida base (7.14) se puede expresar como la suma de las funciones objetivo de cada entidad (7.12) coordinadas con la adecuada selección de los multiplicadores de Lagrange.

$$F^{dis_B} = \sum_c F_c^{dis_B} \tag{7.14}$$

El cálculo de la planificación de las operaciones con coordinación distribuida base se puede realizar por cada entidad compartiendo únicamente los multiplicadores de Lagrange. Las entidades podrán compartir el valor de la función objetivo si desean calcular el valor de la función objetivo de la propuesta de planificación con coordinación distribuida base de todas las entidades. Además, deberán compartir la información de todos aquellos elementos necesarios para el cálculo de los multiplicadores de Lagrange.

En el capítulo cuarto, se observa como el método del subgradiente recogido por Fisher (2004) presenta una rápida convergencia de los multiplicadores de Lagrange a unos valores y de la función dual a una posible solución. Por lo tanto, la actualización de los multiplicadores de Lagrange se propone que se realice con el método del subgradiente recogido por Fisher (2004).

Los T multiplicadores son calculados a partir de las Ecuaciones (7.15), donde se selecciona para cada periodo, el mayor valor entre 0 y el valor del multiplicador previo más el incumplimiento de las restricciones relajadas, afectado por el paso s^j que se calcula a partir de la Ecuación (7.16).

$$u_t^{j+1} = \max \left\{ 0, u_t^j + s^j \left(\sum_c \left(\sum_k TS_{k,r=1,c} \delta_{k,t,c} + \sum_k TO_{k,r=1,c} Z_{k,t,c} \right) - \sum_c KAP_{r=1,c} \right) \right\} \forall t, j \quad (7.15)$$

$$s^j = \frac{\sigma_j (F^{cen*} - F_D^{cen}(u^j))}{\sum_t \left(\sum_c \left(\sum_k TS_{k,r=1,c} \delta_{k,t,c} + \sum_k TO_{k,r=1,c} Z_{k,t,c} \right) - \sum_c KAP_{r=1,c} \right)^2} \quad (7.16)$$

En la Ecuación (7.16), σ_j es un escalar que debe satisfacer la condición de $0 < \sigma_j \leq 2 \forall j$. F^{cen*} es el menor coste de planificación de todas las entidades que cumple con las restricciones relajadas disponible. $F_D^{cen}(u^j)$ es el valor del coste de planificación de todas las entidades penalizado con el incumplimiento de las restricciones de los recursos compartidos y los multiplicadores de Lagrange u_t^j .

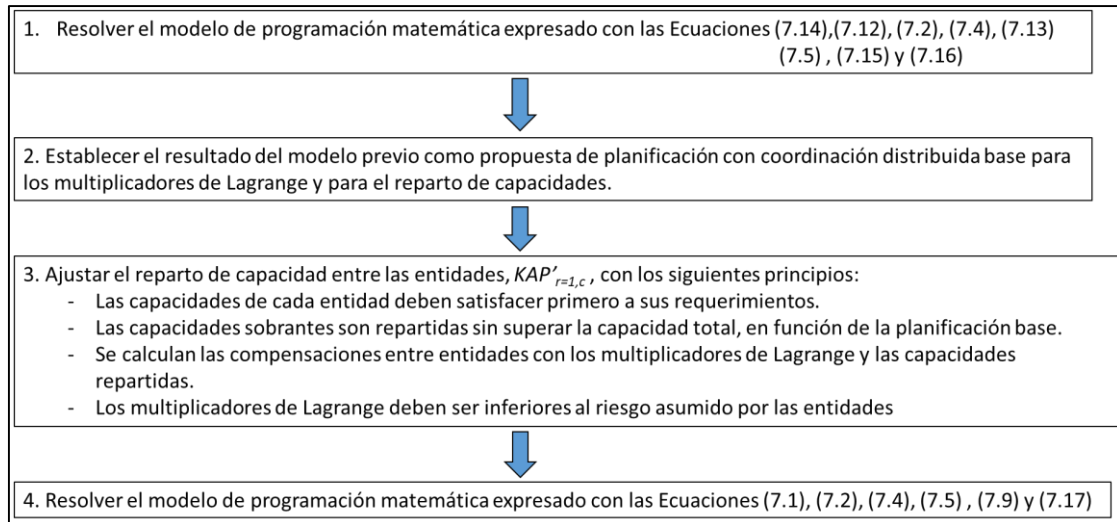
En el cuarto capítulo, se observó cómo el método del subgradiente recogido por Fisher (2004) presentaba una mala convergencia en la función principal. Las propuestas para las variables de decisión que se obtenían al encontrar la solución a la función relajada para cada conjunto de multiplicadores de Lagrange no cumplían con las restricciones relajadas.

Para mejorar la convergencia en la función principal, se propone realizar la planificación de las operaciones en dos fases, tal y como se refleja en la Figura 7-1. En la primera fase se obtiene la propuesta de planificación de la resolución del modelo de programación recogido en las Ecuaciones (7.2), (7.4), (7.5), (7.14), (7.13), (7.15) y (7.16) como propuesta de planificación con coordinación distribuida base. En una segunda fase, las propuestas de planificación de cada entidad se calculan de nuevo, añadiendo las restricciones con respecto al recurso compartido en cada entidad y periodo, Ecuaciones (7.17). La resolución del modelo de programación expresado con las Ecuaciones (7.1), (7.2), (7.4), (7.5), (7.9) y (7.17) es realizada para cada entidad para obtener la propuesta de planificación de operaciones con coordinación distribuida.

$$\sum_k TS_{k,r=1,c} \delta_{k,t,c} + \sum_k TO_{k,r=1,c} Z_{k,t,c} \leq KAP'_{r=1,c,t} \forall t, c \quad (7.17)$$

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

Figura 7-1: Diagrama de flujo del método de resolución aplicado para cada tramo en el que se planifica



Fuente: Elaboración propia.

Las Ecuaciones (7.17) añaden nuevas restricciones a la formulación de cada entidad con respecto a la capacidad del recurso compartido en cada periodo. Los nuevos límites a la capacidad disponible para cada entidad y periodo, $KAP'_{r=1,c,t}$, se establecen en función de la propuesta de planificación con coordinación distribuida base. En aquellas entidades que consumen menos de la capacidad de la entidad, se define $KAP'_{r=1,c,t}$ como la capacidad utilizada en la propuesta de planificación con coordinación distribuida base. Las entidades que no requieren de toda su capacidad ahora tienen este nuevo límite de capacidad, reservando la capacidad no utilizada para las otras entidades. Las entidades con necesidades mayores que la capacidad de sus recursos, dispondrán de más capacidad proveniente de la capacidad de los recursos de las otras entidades no utilizada. La capacidad de los recursos no utilizada de las otras entidades es distribuida proporcionalmente al uso de los recursos propuesto en la propuesta de planificación con coordinación distribuida base.

Las restricciones definidas en las Ecuaciones (7.17) aseguran las necesidades de aquellas entidades que utilizan una fracción de la capacidad de su recurso, según la solución de partida. En la siguiente etapa ofrecen la capacidad sobrante del recurso compartido a las otras entidades proporcionalmente a la capacidad solicitada por la propuesta de planificación con coordinación distribuida base. Se entiende que este reparto ocurre solo cuando al menos una entidad tiene excedente de capacidad disponible del recurso compartido en dicho periodo y al menos otra entidad requiere capacidad de dicho recurso compartido para ese periodo. La suma total de la nueva capacidad disponible, $KAP'_{r=1,c,t}$, será menor o igual a la capacidad total de los recursos. Las entidades volverán a calcular sus planificaciones según la nueva propuesta de capacidad disponible, utilizando para ello las Ecuaciones (7.14). Las entidades que han tenido disponible mayor capacidad en el periodo ejecutado deben compensar a las otras entidades con el resultado de multiplicar la cantidad extra ofrecida por los multiplicadores de Lagrange establecidos.

Los multiplicadores de Lagrange pueden entenderse como la compensación unitaria por el derecho de uso de la capacidad del recurso compartido. Y al multiplicar los multiplicadores de Lagrange por la capacidad ofrecida por cada entidad, estos pueden ser asimilados a la compensación que las entidades deben realizar por el derecho de usar la capacidad adicional. Esta compensación se refiere al derecho de uso y no al uso. Se entiende que los costes asociados por el uso de los recursos para llevar a cabo las operaciones planificadas deben ser soportados por la entidad que hace uso de los recursos compartidos. El coste de ejecución de los *strokes* realizados con esos recursos compartidos es de la entidad que requiere de esas operaciones.

Por otro lado, se debe tener en cuenta que cuando se seleccionan unos valores en los multiplicadores de Lagrange como base y la capacidad asignada a cada entidad es variada según el total de capacidad disponible, la situación de la capacidad asignada respecto de un punto de equilibrio se está modificando. El resultado podrá tender a otros costes, alejándose del resultado de la planificación con coordinación centralizada. Pero, se está garantizando su viabilidad, al asegurar que no se sobrepasa el uso de la capacidad total disponible de los recursos compartidos.

El procedimiento subsana los incumplimientos de las restricciones relajadas del método del subgradiente al forzar un reparto proporcional de la capacidad en función de la mejor propuesta realizada en la convergencia de los multiplicadores de Lagrange del método del subgradiente recogido por Fisher (2004).

En esta nueva situación, las entidades que necesiten más recursos en ciertos periodos tendrán una mayor disponibilidad de capacidad, dependiendo de la utilización de los recursos de las otras entidades, pero sancionadas por las compensaciones admitidas. Las entidades que han reservado capacidad para ceder a otras entidades pueden volver a planificar, incluyendo las compensaciones que perciben de las otras entidades.

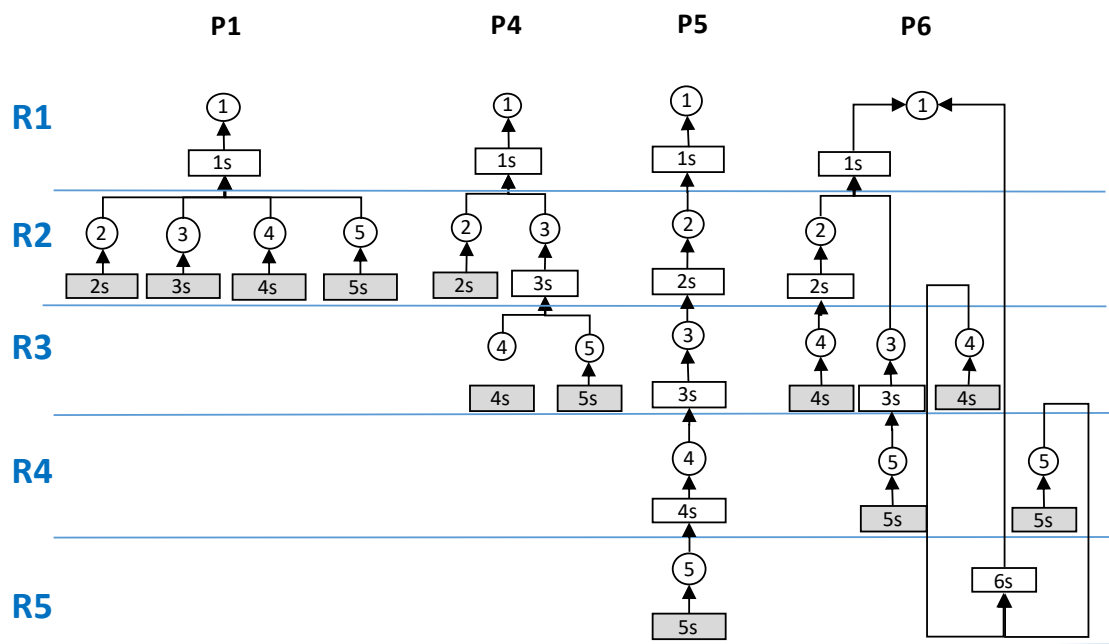
En el siguiente apartado se presentan los resultados de una serie de experimentos con los procedimientos expuestos. Estos experimentos intentan validar la hipótesis de que la planificación con coordinación distribuida presentada, se aproxima a la planificación con coordinación centralizada y mejora con respecto a la planificación descentralizada-descoordinada.

7.4 Diseño de experimentos, selección de instancias

Para validar el procedimiento de coordinación propuesto, se van a comparar los costes totales y el cumplimiento de servicio de cada entidad bajo el procedimiento de horizontes rodantes, entre la planificación con coordinación centralizada, la planificación descentralizada-descoordinada y la propuesta de planificación con coordinación distribuida. Los costes totales se van a calcular como la suma de los costes de los 52 periodos analizados y ejecutados, tal y como es explicado en el capítulo sexto de esta tesis. El nivel de servicio se va a definir como el nivel de demanda insatisfecha en función de la demanda solicitada en los 52 periodos de estudio según la Ecuación (6.9).

En este capítulo, se seleccionan una serie de instancias del banco del capítulo quinto. La selección intenta ser un equilibrio entre una representación del banco de instancias y la capacidad de poder presentar un estudio detallado del mecanismo de coordinación expuesto. Para ello, se seleccionan las estructuras de producto *P1*, *P4*, *P5* y *P6* que se pueden ver en la Figura 7-2. Esta selección es realizada intentando escoger los diferentes extremos de los medibles del nivel de servicio y del coste total que se pueden apreciar en la Figura 6-8 y en la Figura 6-44, definidos y analizados en el capítulo anterior respecto del banco de instancias. La demanda se distribuye entre los 10 productos según el factor de Pareto, *Par00*, en el cual, todos los productos de cada instancia tienen demandas afines. Con respecto a la demanda, se seleccionan las instancias con el patrón de demanda creciente *TT* y el patrón de demanda estacional creciente *ST*, ambos se pueden ver en la Tabla 7-2. Estos patrones de demanda son seleccionados por ser aquellos que presentaban mayores costes totales en el banco de instancias que se puede apreciar en la Figura 6-9. Las demandas están constituidas por una demanda media de μ_t para cada periodo *t*, establecida en 500 unidades, un ruido Z_t calculado por una función aleatoria de tipo uniforme de +/- 5 unidades y una función lineal creciente con pendiente constante por periodo.

Figura 7-2: Estructuras de productos seleccionados.



Fuente: Elaboración propia.

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

Tabla 7-2: Tipos de demanda seleccionados.

Tipo de demanda	Función
Tendencia creciente (TT)	$D_t = \mu_t + 50/100(t/52)\mu_t + Z_t$
Estacional + creciente(ST)	$D_t = \mu_t(1 + \sin(2\pi t/52 + \pi/2)) + 50/100(t/52)\mu_t + Z_t$

μ_t , demanda media según Pareto, B_t crecimiento proporcional a los periodos, Z_t ruido. Fuente: Elaboración propia.

Para esta experimentación se va a seleccionar que la incertidumbre tenga una desviación estándar del 10 por ciento sobre la demanda media del periodo, *CV10*. La incertidumbre es simulada como una variación aleatoria normal (Lee et al., 2006) centrada en la demanda de cada producto en cada tramo en el que se planifica.

Finalmente, en la Figura 7-2 se pueden ver los distintos recursos disponibles para cada tipo de *strokes*. Las operaciones sombreadas no consumen capacidad de los recursos de la entidad, se entienden que son compradas a otras entidades. En este capítulo, se van a seleccionar las disponibilidades de capacidad del 30% (*R30*), del 75% (*R75*) y 100% (*R00*) de todos los recursos. Se seleccionan estos niveles por presentar valores extremos en los costes que se puede apreciar en la Figura 6-18, y en el nivel de servicio que se puede apreciar en la Figura 6-53.

En total, se van a utilizar 288 instancias del banco de instancias presentado en el capítulo quinto. Todos los factores seleccionados se pueden ver en la Tabla 7-3. Por simplificación para este capítulo, la codificación de las instancias seleccionadas se identificará con los elementos diferenciales seleccionados para este capítulo. Sea, por ejemplo, la instancia “Par00_TT_CV10_P1_R00_9” que se interpreta como *Parxx* el tipo de distribución irregular de la demanda o Pareto, *CC* el tipo de demanda, *CVxx* el tipo de incertidumbre en la demanda, *Px* tipo de estructura de producto, *Rxx* nivel de saturación de los recursos y 9 el número de la instancia, se identificará en este capítulo como TTP1R00_9. Y al conjunto de instancias con esta misma combinación de factores como TTP1R00 que incluye “Par00_TT_CV10_P1_R00_1”, “Par00_TT_CV10_P1_R00_2”, “Par00_TT_CV10_P1_R00_3”, “Par00_TT_CV10_P1_R00_4”, “Par00_TT_CV10_P1_R00_5”, “Par00_TT_CV10_P1_R00_6”, “Par00_TT_CV10_P1_R00_7”, “Par00_TT_CV10_P1_R00_8”, “Par00_TT_CV10_P1_R00_9”, “Par00_TT_CV10_P1_R00_10”, “Par00_TT_CV10_P1_R00_11” y “Par00_TT_CV10_P1_R00_12”.

Tabla 7-3: Factores seleccionados.

Pareto	Demanda	Incertidumbre	BOM	Saturación	Instancias
Par00	TT, ST	CV10	P1, P4, P5, P6	R30, R75, R00	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12

Fuente: Elaboración propia.

7.5 Análisis de los resultados conseguidos de las propuestas de planificación con coordinación centralizada y planificación descentralizada-descoordinada

Para calcular la planificación con coordinación centralizada, se establece que las tres entidades ceden toda la información a un tercero independiente para que genere las propuestas de planificación de operaciones para cada una de ellas. Este tercero independiente buscará minimizar los costes acumulados de todas las entidades coordinadas y permitirá el uso compartido de la capacidad de los recursos que pueden ser compartidos por cada una de las entidades involucradas. Se establece que el recurso $R1$ de las tres entidades independientes es el compartido. El recurso $R1$ de las tres entidades se puede utilizar para la preparación y realización de los strokes que requieran del recurso $R1$ en las tres entidades. Los recursos $R1$ de las tres entidades tienen iguales características, por lo que puede ser utilizados indistintamente por las tres entidades. La formulación para la planificación con coordinación centralizada de las tres entidades se modeliza con la función objetivo de la Ecuación (7.7) y con las restricciones de las Ecuaciones (7.2), (7.4), (7.5), (7.8) y (7.9).

Se asume que cada instancia del banco de instancias recopila los datos que definen a cada una de las entidades. Para llevar a cabo estos experimentos numéricos, las instancias se seleccionan de forma alfanumérica, de modo que TTP1R00_1, TTP1R00_2, TTP1R00_3 son las tres instancias a partir de las cuales se buscará la propuesta de planificación con coordinación centralizada. Esta selección implica que otras posibles combinaciones de instancias puedan realizarse, pero se desea analizar cuando las entidades son equivalentes dejando para futuras investigaciones otras posibles combinaciones entre entidades. En el Anexo 5 se pueden ver los resultados positivos en el caso de tres entidades diferentes STP1R30, STP4R30 y TTP5R30. Las tres entidades mejoran en costes y en nivel de servicio con la propuesta de planificación con coordinación distribuida frente a la propuesta de planificación descentralizada-descoordinada. Por lo que se decide centrar este capítulo en las combinaciones de entidades afines.

La planificación descentralizada-descoordinada se entiende, para este capítulo, como la propuesta de planificación que se obtiene del modelado con la función objetivo de la Ecuación (7.6) y con las restricciones de las Ecuaciones (7.2), (7.3), (7.4) y (7.5), para cada una de las instancias.

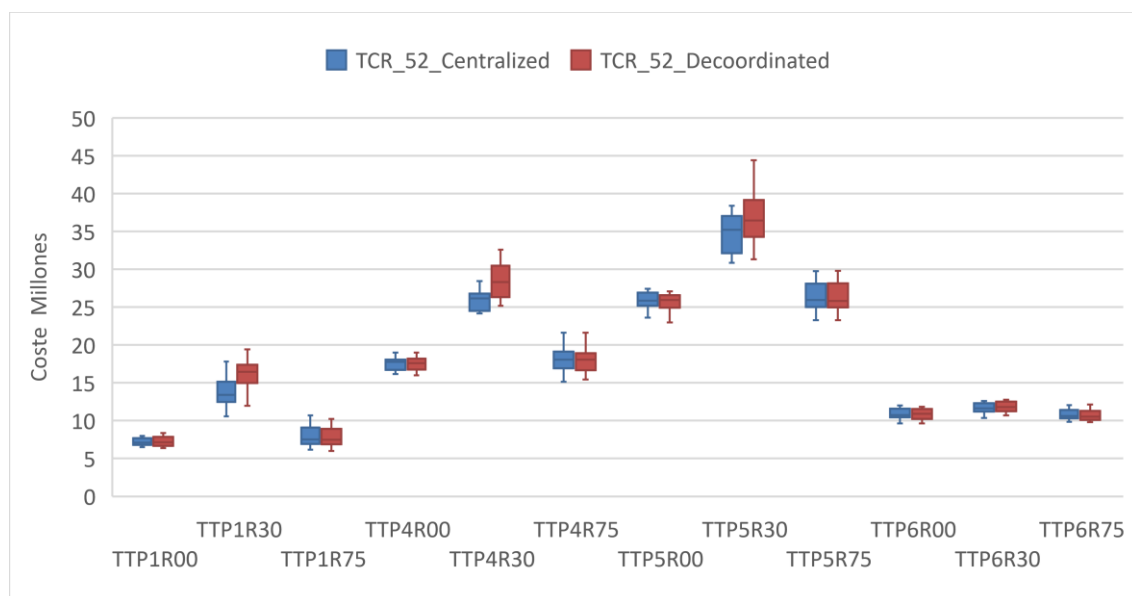
Para el cálculo de las propuestas de planificación para las diferentes situaciones, se aplica el procedimiento heurístico de horizonte rodantes, habitual tanto en la industria como a nivel académico (de Sampaio et al., 2017). El procedimiento de horizontes rodantes se define con un horizonte de planificación de ocho periodos y un periodo congelado, es decir, solo se ejecuta el primer periodo, tal y como fue realizado en el capítulo quinto. Esta selección permite comparar con los resultados de la experimentación del banco de instancias realizados en el capítulo anterior. En cada periodo, se calcula la planificación a partir de los resultados de la ejecución de la planificación previa y la actualización de la previsión de la demanda para los ocho nuevos periodos. Los resultados del periodo ejecutado se convierten en las situaciones de inicio en el

siguiente tramo en el que se planifica, las existencias iniciales, los retrasos y las órdenes lanzadas.

La búsqueda de la mejor propuesta de planificación de operaciones en cada tramo en el que se planifica se realiza con el programa de optimización comercial GUROBI® 7.0.2 64bits para Linux, seleccionado en base a su rendimiento superior (Meindl et al., 2012) ejecutado en el clúster “Rigel” (ASIC, 2018). Se define un gap del 1%, un límite de procesamiento de cada tramo en el que se planifica de 3.000 segundos y de 125 horas para cada instancia.

La distribución de los resultados obtenidos de los costes totales para los 52 periodos de análisis de las propuestas de planificación descentralizada-descoordinada y de las propuestas de planificación con coordinación centralizada de las instancias seleccionadas con demanda creciente (*TT*), se pueden observar en la Figura 7-3. De ella se destaca que cuando menores son las capacidades disponibles, las propuestas de planificación con coordinación centralizada presentan menores costes que las propuestas de planificación descentralizada-descoordinada. En las instancias TTP1R30, TTP4R30 y TTP5R30 se aprecian las mayores diferencias entre las distribuciones de los costes totales de los 52 periodos de análisis de las dos formas de obtener las propuestas de planificaciones. En las instancias TTP6R30, la alternativa de proceso de la estructura (*P6*) permite disponer de capacidad suficiente, por lo que no se aprecia una mejora con respecto a los costes asociados de la propuesta de planificación centralizada. En las instancias con tipos de producto (*P6*), las entidades tienen alternativas de procesos y de productos que permiten compensar la reducción de recursos de (*R30*).

Figura 7-3: Comparativa de costes totales de los 52 periodos de estudio entre descentralizada-descoordinada y coordinación centralizada donde cada tres entidades comparten la capacidad del primer recurso, para tipos de demanda creciente.

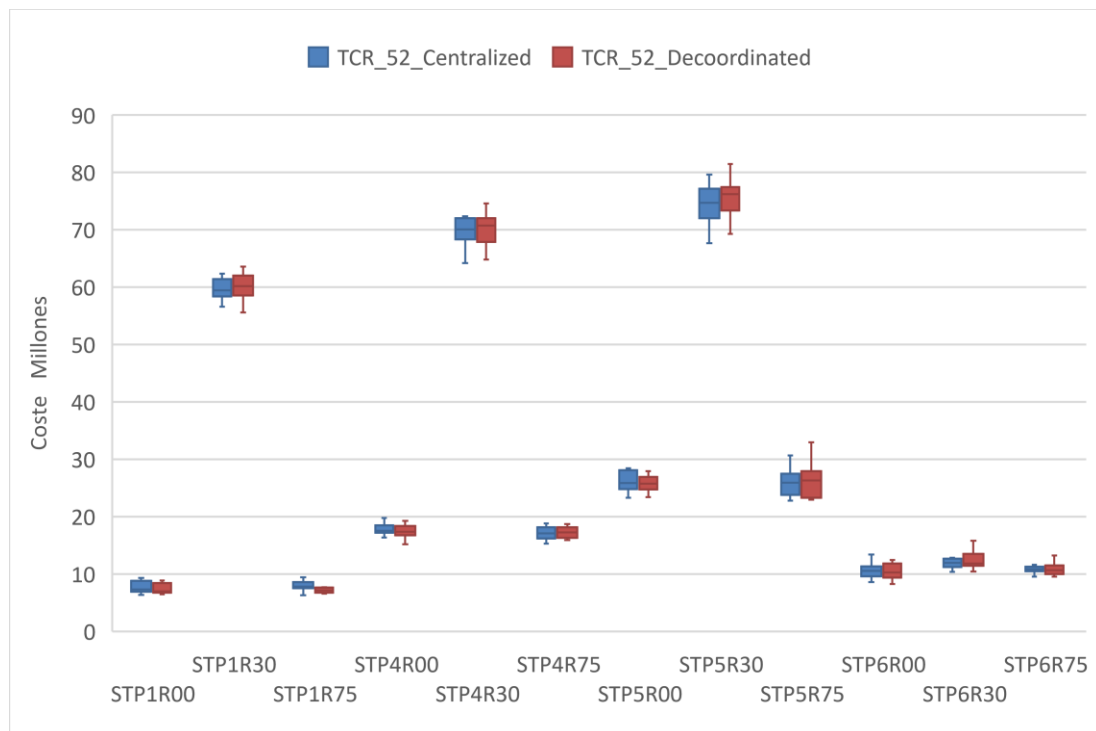


TTP1R00 demanda creciente, estructura producto P1, Recursos disponibles al 100%; TCR_52_Centralized valores de costes totales de los 52 periodos analizados con las tres entidades centralizadas en el recurso compartido; TCR_52_Decoordinated valores de costes totales de los 52 periodos analizados con las entidades descentralizada-descoordinadas. Fuente: Elaboración propia.

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

La Figura 7-4 muestra los costes totales para los 52 periodos de análisis de las propuestas de planificación descentralizada-descoordinada y de las propuestas de planificación con coordinación centralizada de las instancias seleccionadas con demanda estacional creciente (ST). En este caso se observa que el compartir el recurso (R1) no permite identificar una reducción de costes claramente entre las propuestas de planificación con coordinación centralizada y los costes de las propuestas de planificación descentralizada-descoordinada.

Figura 7-4: Comparativa de costes totales de los 52 periodos de estudio entre descentralizada-descoordinada y coordinación centralizada donde cada tres entidades comparten la capacidad del primer recurso, para tipos de demanda estacional creciente.

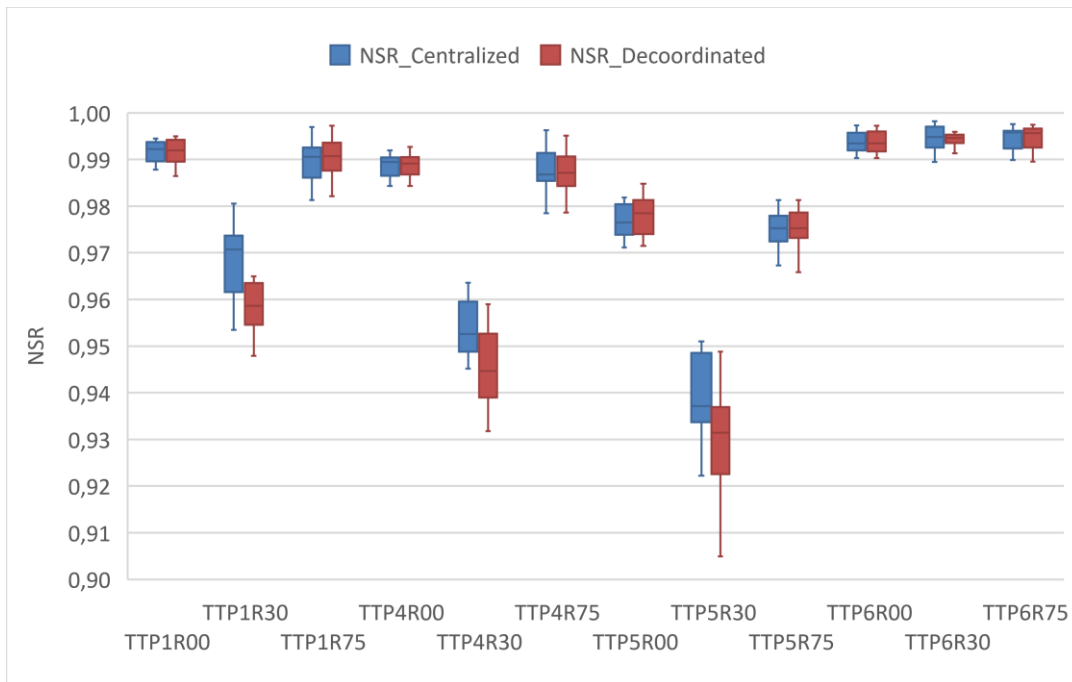


STP1R00 demanda estacional creciente, estructura producto P1, Recursos disponibles al 100%; TCR_52_Centralized valores de costes totales de los 52 periodos analizados con las tres entidades centralizadas en el recurso compartido; TCR_52_Decoordinated valores de costes totales de los 52 periodos analizados con las entidades descentralizada-descoordinadas. Fuente: Elaboración propia.

El cumplimiento de servicio en los 52 periodos de análisis de las propuestas de planificación descentralizada-descoordinada y de las propuestas de planificación con coordinación centralizada de las instancias seleccionadas con demanda creciente (TT), se pueden observar en la Figura 7-5. En ella se puede observar cómo la distribución de los niveles de servicio del grupo de instancias TTP1R30, TTP4R30 y TTP5R30 presentan una distribución con mejor nivel de servicio con las propuestas de planificación con coordinación centralizada que con las propuestas de planificación descentralizada-descoordinada.

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

Figura 7-5: Comparativa del nivel de servicio de los 52 periodos de estudio entre descentralizada-descoordinada y coordinación centralizada donde cada tres entidades comparten las capacidades del primer recurso, para tipos de demanda creciente.

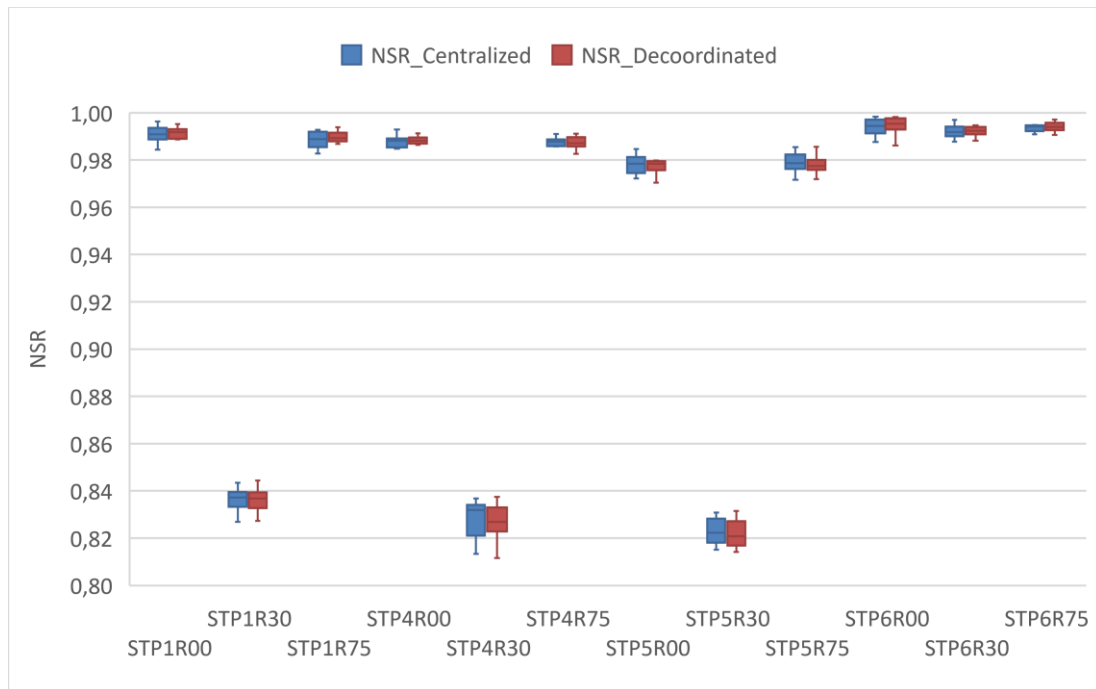


TTP1R00 demanda creciente, estructura producto P1, Recursos disponibles al 100%; NSR_Centralized valores del nivel de servicio de los 52 periodos analizados con las tres entidades centralizadas en el recurso compartido; NSR_Decoordinated valores del nivel de servicio de los 52 periodos analizados con las entidades descentralizada-descoordinadas. Fuente: Elaboración propia.

El cumplimiento de servicio en los 52 periodos de análisis de las propuestas de planificación descentralizada-descoordinada y de las propuestas de planificación con coordinación centralizada de las instancias seleccionadas con estacional creciente (ST), se pueden observar en la Figura 7-6. En ella se observa que no hay una destacada mejora del nivel de servicio entre las propuestas de planificación con coordinación centralizada y los niveles de servicio de las propuestas de planificación descentralizada-descoordinada en patrones de demanda estacional creciente.

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

Figura 7-6: Comparativa del nivel de servicio de los 52 periodos de estudio entre descentralizada-descoordinada y coordinación centralizada donde cada tres entidades comparten las capacidades del primer recurso, para tipos de demanda estacional creciente.



STP1R00 demanda estacional creciente, estructura producto P1, Recursos disponibles al 100%; *NSR_Centralized* valores del nivel de servicio de los 52 periodos analizados con las tres entidades centralizadas en el recurso compartido; *NSR_Decoordinated* valores del nivel de servicio de los 52 periodos analizados con las entidades descentralizada-descoordinadas. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 7-3 y la Figura 7-4 aportan la distribución de los costes totales de las instancias seleccionadas, 12 instancias en cada combinación de factores. La Figura 7-5 y la Figura 7-6 aportan el nivel de servicio de las 12 instancias en cada combinación de factores. De las 4 figuras se puede destacar que las restricciones de capacidad (*R75*) no tienen efectos apreciables respecto de disponer del 100% de la capacidad (*R00*) en las estructuras de producto (*P1*), (*P4*), (*P5*) y (*P6*). Las demandas requeridas pueden ser suministradas con la capacidad disponible y no aporta una ventaja el compartir la capacidad del recurso (*R1*). Pero, es apreciable que, si la capacidad disponible es del (*R30*) y las estructuras de producto son (*P1*), (*P4*) y (*P5*), compartir la capacidad del recurso (*R1*) entre las entidades permite un ahorro en los costes totales y una mejora en el nivel de servicio en las demandas tipo (*TT*), pero no es apreciable en las demandas (*ST*) aunque presentan mayores costes como se podía apreciar en la Figura 6-9.

Al evaluar los valores de *TTP1R30* entre pares por el test de los signos de sus medianas respecto de los costes totales de las propuestas de planificación con coordinación centralizada y de los costes de las propuestas de planificación descentralizada-descoordinada se observa que la hipótesis nula, que sean iguales, puede ser rechazada con una fiabilidad superior al 95% (Valor- $P = 0.00937$). Por lo que se puede afirmar que en las instancias *TTP1R30* la propuesta de

planificación con coordinación centralizada genera unos costes diferenciados respecto de los costes de las propuestas de planificación descentralizada-descoordinadas.

No se ha observado una reducción generalizada de los costes por haber compartido capacidades entre las propuestas de planificación con coordinación centralizada y las propuestas de planificación descentralizada-descoordinada, excepto en las instancias con la combinación TTP1R30, TTP4R30 y TTP5R30. En estas instancias se observa una mejora tanto en la distribución de costes como en la distribución del nivel de servicio entre las propuestas de planificación descentralizada-descoordinada y las propuestas de planificación con coordinación centralizada.

A continuación, se realiza la comparación y análisis entre la planificación con coordinación centralizada, planificación descentralizada-descoordinada y el método propuesto para la planificación con coordinación distribuida.

7.6 Detalle de la aplicación del procedimiento para el cálculo de las propuestas de planificación con coordinación distribuida

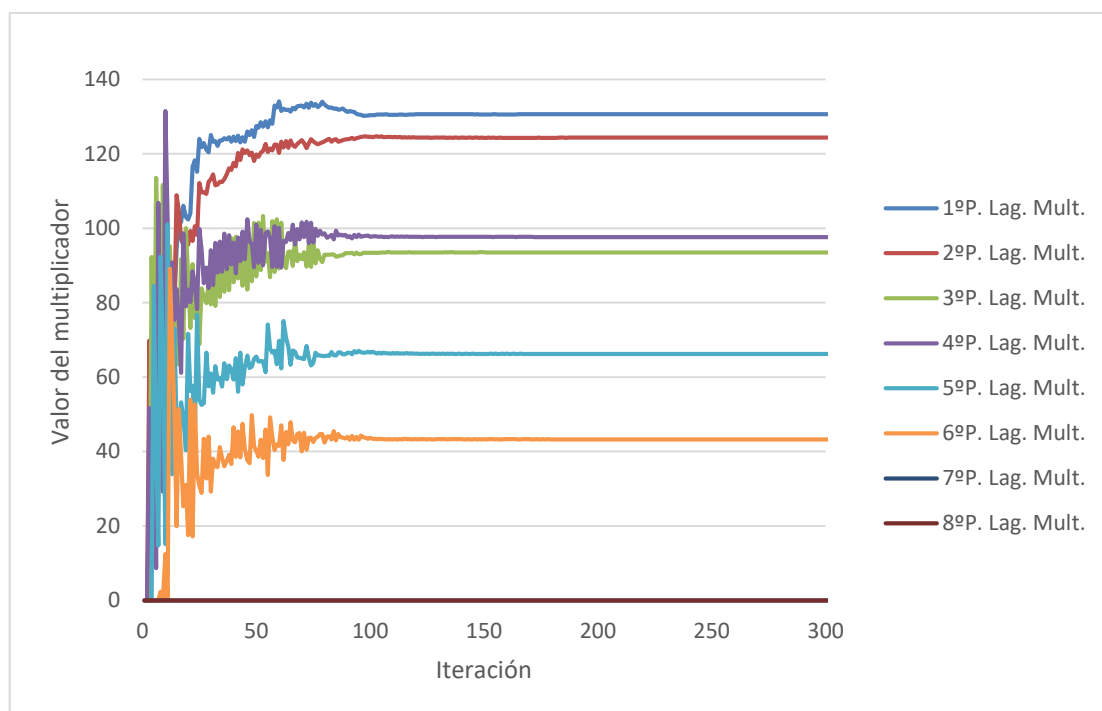
En la planificación de las operaciones con coordinación distribuida, al igual que con la coordinación centralizada, tres entidades comparten la capacidad de sus primeros recursos, ($R1$). Sin embargo, estas entidades establecen una compensación unitaria interna por el derecho al uso de estos recursos compartidos en cada periodo, como herramienta para obtener la propuesta de planificación con coordinación distribuida.

La operativa intenta aproximarse a una posible realidad industrial. Las entidades se informan mutuamente de su previsión de capacidad sobrante o necesidad de capacidad adicional para los próximos periodos, junto con la suma de los ahorros de todas las entidades que implica disponer de más capacidad. Posteriormente, con esta información disponible, todas las entidades pueden calcular los multiplicadores de Lagrange o compensación por el derecho de uso de la capacidad compartida en cada periodo. Una vez conocidos los multiplicadores de Lagrange para cada periodo, cada entidad puede actualizar su situación de capacidad sobrante o necesidad de capacidad adicional en cada periodo del tramo en el que se planifica con estas compensaciones. También pueden actualizar el diferencial de todas las entidades de los ahorros obtenidos con las nuevas compensaciones. La planificación con coordinación distribuida permite disponer de una capacidad extra, pero con un coste por el derecho de uso que aportan los multiplicadores de Lagrange. Luego, con esta nueva información disponible, todas las entidades pueden volver a calcular los multiplicadores de Lagrange para cada periodo. Estos pasos se repiten hasta que alcanzan una situación estable en los multiplicadores de Lagrange para todos los periodos de planificación en cada tramo en el que se planifica.

Tal y como fue planteado en el capítulo cuarto, para el cálculo de los multiplicadores de Lagrange se empezará con σ_0 igual a 2 y se reducirá a la mitad, si el resultado de la suma de las funciones objetivo de cada entidad con el multiplicador de Lagrange no ha mejorado el límite inferior después de 10 iteraciones. El número de iteraciones en la actualización del multiplicador de Lagrange antes de finalizar el proceso, se define en 300 iteraciones de actualización.

En la Figura 7-7 se puede observar una de las evoluciones de los multiplicadores de Lagrange para cada restricción del recurso compartido, para los ocho periodos del horizonte de planificación, entre tres instancias. En las iteraciones iniciales se observan las oscilaciones de los multiplicadores de Lagrange. En las primeras iteraciones distintas propuestas de compensaciones se calculan hasta tender a una convergencia de las compensaciones en las sucesivas iteraciones. En las últimas iteraciones se aprecia una estabilidad en los valores propuestos para los multiplicadores de Lagrange. Los multiplicadores de Lagrange de los periodos séptimo y octavo toman valores nulos. Equivalente evolución de los multiplicadores se observó en los cálculos presentados en el capítulo cuarto que se puede apreciar en la Figura 4-6.

Figura 7-7: Representación de los multiplicadores de Lagrange en las primera 300 iteraciones, en el tramo en el que se planifica el periodo 49, en la instancia STP1R30_4 que comparte capacidad con STP1R30_5 y STP1R30_6



STP1R30_4 Demanda estacional creciente estructura de producto P1 capacidad disponible al 30% y la instancia 4 que se coordina con las instancias 5 y 6. Fuente: Elaboración propia

Los multiplicadores de Lagrange penalizan en la función objetivo cada restricción relajada, en este caso, la limitación de la capacidad total disponible en cada periodo. El multiplicador de Lagrange aumenta su valor cuando las entidades necesitan más capacidad que la disponible para ese periodo y tiende a 0 si hay capacidad suficiente para satisfacer las necesidades de todas las entidades en ese periodo. Cuando se aplica el método del subgradiente recogido por Fisher (2004), los multiplicadores tienden a converger con las sucesivas iteraciones a unos valores, donde los costes totales de la planificación de las operaciones se acercan a los costes totales obtenidos de la propuesta de planificación con coordinación centralizada.

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

Las entidades que requieren de más capacidad de la que tienen disponible deben evaluar entre los costes asociados al uso de las capacidades penalizadas por los multiplicadores de Lagrange y los costes de otras alternativas posibles. Las entidades adelantan o atrasan las operaciones que consumen la capacidad de esos recursos, con el fin de evitar las penalizaciones. Estas modificaciones en la planificación de operaciones implican costes inferiores a los costes asociados a las penalizaciones que soportarían por el uso de la capacidad de los recursos compartidos. Algunas entidades liberan capacidad que otras entidades pueden necesitar con mayor urgencia, dispuestas a soportar unos sobrecostes con tal de evitar costes mayores. Los multiplicadores de Lagrange tienden a unos valores de equilibrio entre las compensaciones y la modificación de la planificación en cada periodo. Algunas entidades utilizan más de la capacidad que aportan, por lo que la penalización que soportan debe compensar a las entidades que utilizan menos de la capacidad que aportan y están cediendo parte de su capacidad.

Una vez que los multiplicadores de Lagrange se han estabilizado, se selecciona la propuesta de planificación que genera el menor diferencial acumulado entre los coste totales de la propuesta de planificación y las propuestas de planificación con penalizaciones al uso de los recursos compartidos, siguiendo el método del subgradiente recogido por Fisher (2004). Estas propuestas se identifican en este capítulo como propuestas de planificación con coordinación distribuida base.

Sin embargo, debe recordarse que la suma de las capacidades requeridas en estas propuestas de planificación generalmente requiere de una capacidad mayor que la capacidad total de los recursos compartidos por las tres entidades, como se identifica en el capítulo cuarto de esta tesis. Las soluciones generadas para la función relajada no son generalmente válidas en la función principal con el método del subgradiente recogido por Fisher (2004).

Estas penalizaciones y propuestas de uso de la capacidad total en cada entidad para cada periodo permiten añadir las nuevas restricciones a cada entidad, Ecuaciones (7.17). Estas nuevas restricciones reparten proporcionalmente la capacidad total según la propuesta seleccionada como base por entidad y periodo. Esta distribución prioriza a aquellas entidades que han previsto en la planificación con coordinación distribuida con base el uso de menos capacidad que la capacidad que tienen y distribuye proporcionalmente las capacidades sobrantes en función de la propuesta de planificación con coordinación distribuida base. Este planteamiento asume que las entidades primero reservan su capacidad para sus requerimientos previstos en la planificación con coordinación distribuida base y si tienen previsión de capacidad sobrante en la planificación con coordinación distribuida base permitirán el uso del recurso sobrante por otra entidad. Esta selección implica que se alejan de una planificación con coordinación centralizada, pero se acercan al planteamiento de entidades independientes. Las entidades independientes primero asegurarán sus necesidades antes de plantearse ceder capacidad a otras entidades. Por lo tanto, en los periodos en los que hay alguna entidad dispuesta a ceder capacidad y alguna que necesite capacidad adicional, las capacidades cedidas se ajustan proporcionalmente a la capacidad solicitada según la planificación con coordinación distribuida base, tal que la

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

capacidad total cedida es menor o igual a la capacidad total no reservada por cada entidad a su recurso.

La Tabla 7-4 muestra los valores que toman los multiplicadores de Lagrange y la capacidad requerida por cada entidad en cada periodo, en la propuesta de planificación con coordinación distribuida base para la coordinación distribuida entre unas instancias, en un tramo en el que se planifica. El primer periodo será el ejecutado y el resto de periodos que aparecen son previsiones para los siguientes periodos. La tabla también muestra los valores de $KAP'_{r=1,c,t}$, de las Ecuaciones (7.17), utilizados para la segunda fase del cálculo de la planificación de las operaciones con coordinación distribuida, junto con las penalizaciones que cada entidad soporta por la capacidad extra que dispone o las bonificaciones por la capacidad cedida. La última columna de cada entidad identifica el uso de la capacidad disponible que las entidades realizan de los recursos compartidos. Como se puede observar la propuesta de planificación con coordinación distribuida presentada, se acerca al uso completo de la capacidad disponible de los tres recursos $1.799un$, pero sin llegar a sobrepasar la capacidad máxima disponible, que en estas instancias es de $1.800un$ ($600+600+600$). La propuesta de planificación con coordinación distribuida base requiere de una capacidad superior a la disponible ($737+793+428=1.958 un >1.800un$).

Tabla 7-4: Multiplicadores de Lagrange, capacidades y costes en las instancia STP1R30_4, STP1R30_5 y STP1R30_6 en el tramo en el que se planifica el periodo 27 en la planificación con coordinación distribuida

Periodo	Multiplicador de Lagrange	STP1R30_4				STP1R30_5				STP1R30_6				Total capacidad
		Prop. Base	KAP'	Penalizaciones	Uso final	Prop. Base	KAP'	Penalizaciones	Uso final	Prop. Base	KAP'	Penalizaciones	Uso final	
27	87,75	737	671	6.230	670	793	701	67.670	701	428	428	-120.572	428	1799
28'	11,49	447	519	-931	494	637	637	18.278	637	644	644	28.028	644	1775
29'	2,08	521	596	-8	521	610	610	5.210	598	492	594	-3.588	492	1611
30'		121	600		231		600		109	109	600		109	449
31'		90	600			80	600		80		600			80
32'			600				600				600			
33'			600				600				600			
34'			600				600				600			

Multiplicador de Lagrange para la restricción de capacidad compartida en el periodo 27 en el tramo en el que se planifica del periodo 27 de la mejor propuesta a la función relajada como solución base. Fuente: Elaboración propia

Las entidades primero intentarán cubrir sus necesidades antes de ceder capacidad. Cuando los requerimientos de todas las entidades crecen, las entidades deben ponderar otros costes para liberar capacidad y poderla compartir a cambio de compensaciones por cederla. Por lo tanto, las entidades incrementarán sus costes, por ejemplo, adelantando la planificación con mayores costes de almacenaje, pero perciben compensaciones por la capacidad que liberan que otra entidad puede requerir con más necesidad. Las entidades que obtienen capacidad extra pueden realizar operaciones, pero deben compensar por la capacidad extra recibida. Los costes de las compensaciones son inferiores a los costes que incurrirían si no dispusieran de esta capacidad extra. Un ejemplo es un incremento de la demanda en el periodo a ejecutar que puede generar elevados costes de penalizaciones por retraso.

Este método de actualización de los multiplicadores de Lagrange puede provocar en las entidades reticencias a ceder capacidad cuando las compensaciones son altas. Las entidades

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

serán reacias a incrementar mucho sus costes, aunque las compensaciones sean igualmente muy altas. En situaciones de altas compensaciones, las entidades tendrán igualmente altos requerimientos para cada una de las entidades, por lo que primero intentarán cubrir sus necesidades antes de ceder capacidad a cambio de una compensación alta de otras entidades. El método de cálculo de los multiplicadores de Lagrange tiende a elevar el valor de los multiplicadores cuando más necesidad hay de esos recursos compartidos. Este incremento busca encontrar un punto de equilibrio entre cumplir la restricción relajada y el resto de costes de cada entidad.

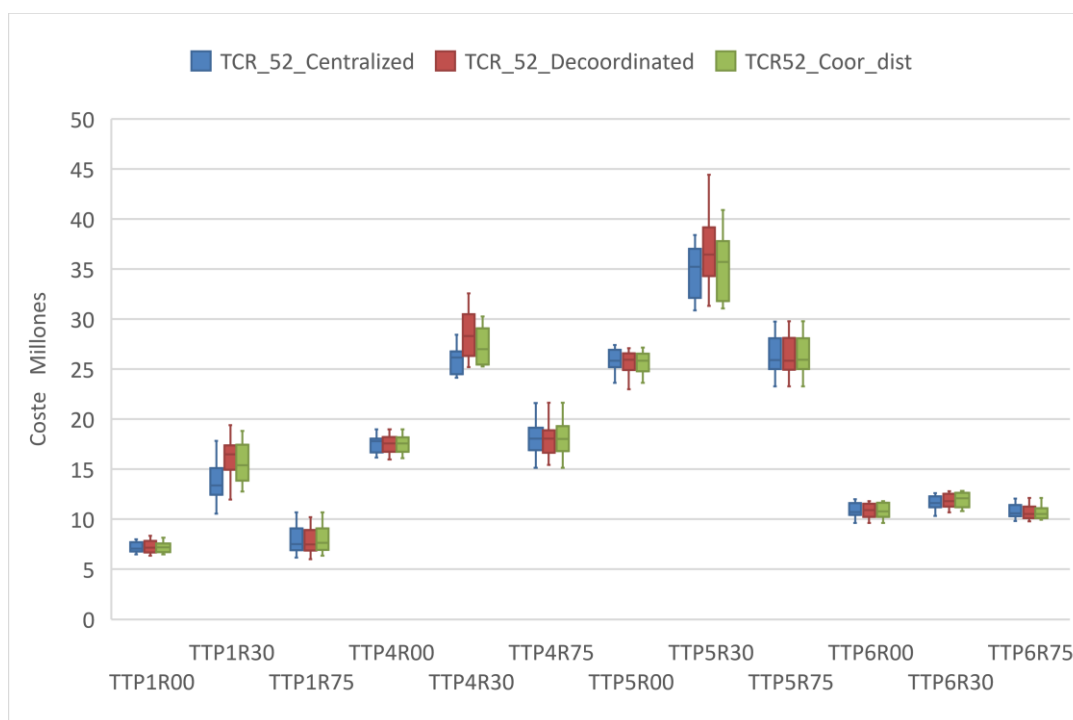
A compensaciones unitarias altas las entidades serán reacias a compartir capacidad, dado que implicaría altos costes en las operaciones de la entidad, aunque pudieran tener compensaciones de otras entidades. Si no comparten su capacidad, podrán disponer de planificaciones con menores costes para atender las necesidades de la entidad y con los únicos riesgos de la entidad. Las compensaciones unitarias con las cuales se quiere establecer la coordinación deben ser inferiores al límite aceptado por las entidades. Este límite de compensación unitario se refiere al hecho de que las entidades no desearán compartir sus recursos propios en situaciones de alta demanda, dado que priorizarán primero sus propios requerimientos, evitando penalizaciones por demoras presentes o futuras, antes de ceder capacidad a cambio de una posible compensación por el recurso compartido con otra entidad. En estos experimentos, el límite para los multiplicadores de Lagrange se define en 300 unidades monetarias. Esta elección abre la posibilidad de futuras líneas de investigación entre los límites y compensaciones que pueden llegar a tener entre las entidades. El límite a los multiplicadores de Lagrange aleja la propuesta de planificación de la que se obtendría de una planificación con coordinación centralizada, pero se entiende que las entidades primero buscarán satisfacer sus necesidades altas antes de plantear compartir capacidad. En el ANEXO 6 se adjunta una comparativa en el caso de que no se establezcan límites a los multiplicadores de Lagrange, llegando a compensaciones elevadas, del 23,4% respecto del valor de la función objetivo en un tramo en el que se planifica.

Una vez que se hayan establecido las propuestas de capacidad cedida y compensaciones unitarias, las entidades pueden volver a calcular su planificación de operaciones, pero con las nuevas restricciones añadidas a cada entidad, Ecuaciones (7.17). Las compensaciones unitarias establecidas permiten definir los costes adicionales por el derecho de uso de los recursos compartidos que las entidades están dispuestas a compensar durante cada periodo. Las entidades con capacidad excedente pueden volver a calcular su planificación ajustando a la capacidad disponible de las restricciones añadidas, Ecuaciones (7.17), junto con la compensación por los derechos de uso de la capacidad del recurso compartido. Este proceso que se puede apreciar en la Figura 7-1, y se repite en cada tramo en el que se planifica.

7.7 Análisis de los resultados conseguidos de las propuestas de planificación con coordinación distribuida

En las Figura 7-8 se puede observar cómo los costes totales de la propuesta de planificación con coordinación distribuida se acercan a los costes totales de la propuesta de planificación con coordinación centralizada bajo el procedimiento de horizontes rodantes con demanda creciente, mejorando respecto de la descentralizada-descoordinada, en TTP1R30, TTP4R30 y TTP5R30. Respecto del nivel de servicio entre las distintas propuestas de planificación se observa equivalente comportamiento en la Figura 7-9. Los niveles de servicio de las propuestas de planificación con coordinación distribuida superan a los niveles de servicio de las propuestas de planificación descentralizada-descoordinada y se acercan a los niveles de servicio de las propuestas de planificación centralizada.

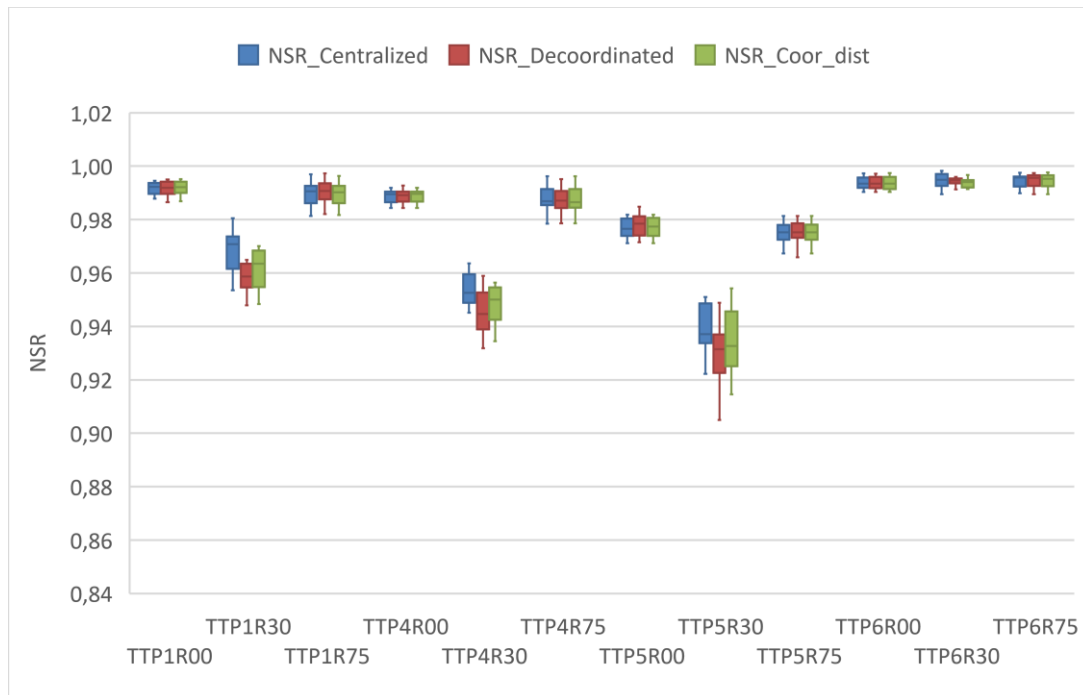
Figura 7-8: Representación gráfica comparativa de los costes totales de la coordinación centralizada, descentralizada-descoordinada y la distribuida.



TTP1R30 demanda creciente, estructura producto P1, Recursos disponibles al 30%; *TCR_52_Centralized* valores de costes totales de los 52 periodos analizados con las tres entidades centralizadas en el recurso compartido; *TCR_52-Decoordinated* valores de costes totales de los 52 periodos analizados con las entidades descentralizada-descoordinadas, *TCR52_Coor_dist* valores de costes totales de los 52 periodos analizados con las tres entidades que comparten un recurso coordinadas por la compensación unitaria por el uso de dichos recursos compartidos y aplican una coordinación distribuida. Fuente: Elaboración propia.

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

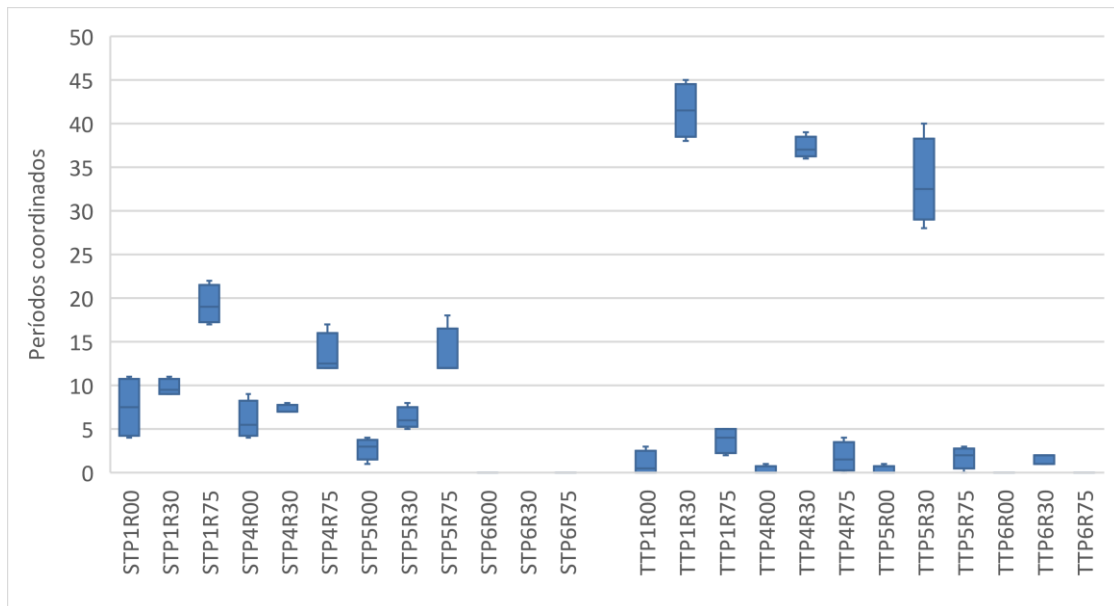
Figura 7-9: Representación gráfica comparativa del nivel de servicio respecto de la coordinación centralizada, descentralizada-descoordinada y la distribuida, con demanda creciente.



TTP1R30 demanda creciente, estructura producto P1, Recursos disponibles al 30%; *NSR_Centralized* valores del nivel de servicio de los 52 periodos analizados con las tres entidades centralizadas en el recurso compartido; *NSR_Decoordinated* valores del nivel de servicio de los 52 periodos analizados con las entidades descentralizada-descoordinadas; *NSR_Coor_dist* valores del nivel de servicio de los 52 periodos analizados con las tres entidades que comparten un recurso coordinadas por la compensación unitaria por el uso de dichos recursos compartidos y aplican una coordinación distribuida. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 7-10 se puede observar la distribución del número de periodos ejecutados que se está compartiendo capacidad entre las entidades. De esta figura se entiende que en las instancias con mayor número de periodos en los cuales las entidades comparten capacidad, TTP1R30, TTP4R30 y TTP5R30, la planificación con coordinación distribuida puede conseguir mejores resultados que con la planificación descentralizada-descoordinada donde no se comparte capacidad.

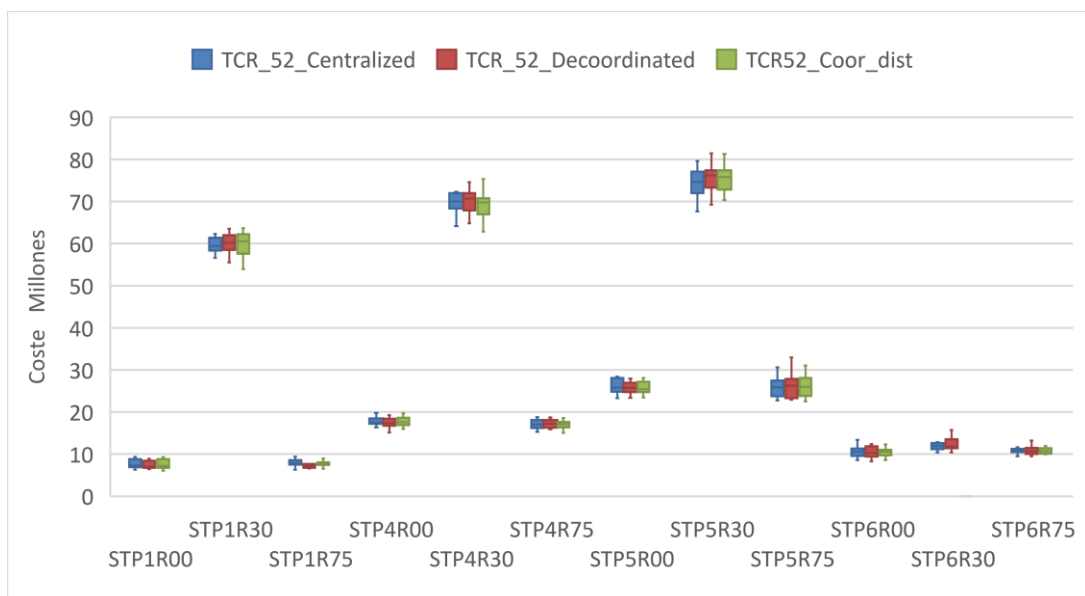
Figura 7-10: Número de periodos ejecutados que se comparte capacidad entre las entidades



En el Anexo 4 están disponibles los valores. Fuente: Elaboración propia.

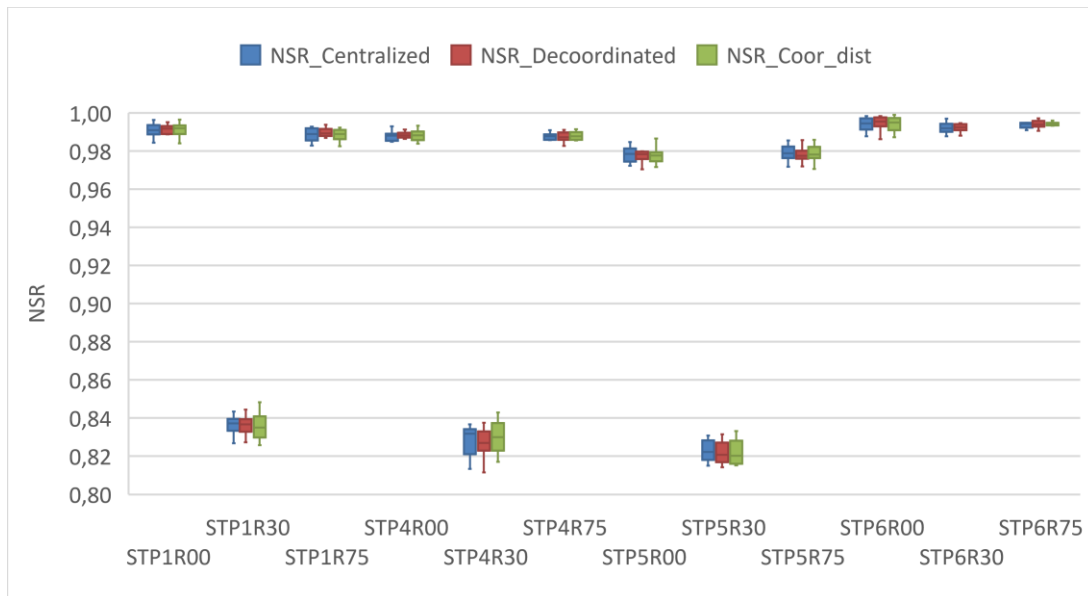
En la Figura 7-11 se observan las distribuciones de los costes totales de las propuestas de planificación descentralizada-descoordinada, con coordinación distribuida, con coordinación centralizada, en situaciones con demanda estacional creciente, sin apreciar diferencias en las distribuciones de costes. Respecto del nivel de servicio entre estas propuestas de planificación se observa equivalente comportamiento en la Figura 7-12.

Figura 7-11: Representación gráfica comparativa de los costes totales de la coordinación centralizada, descentralizada-descoordinada y la distribuida con demanda estacional creciente.



Fuente: Elaboración propia.

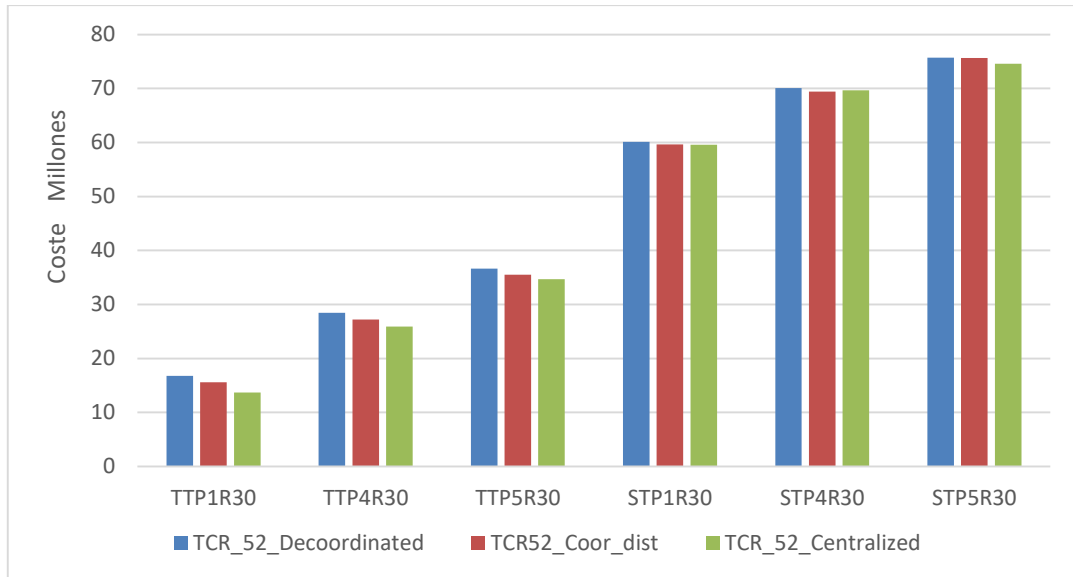
Figura 7-12: Representación gráfica comparativa del nivel de servicio respecto de la coordinación centralizada, descentralizada-descoordinada y la distribuida, con demanda estacional creciente.



Fuente: Elaboración propia.

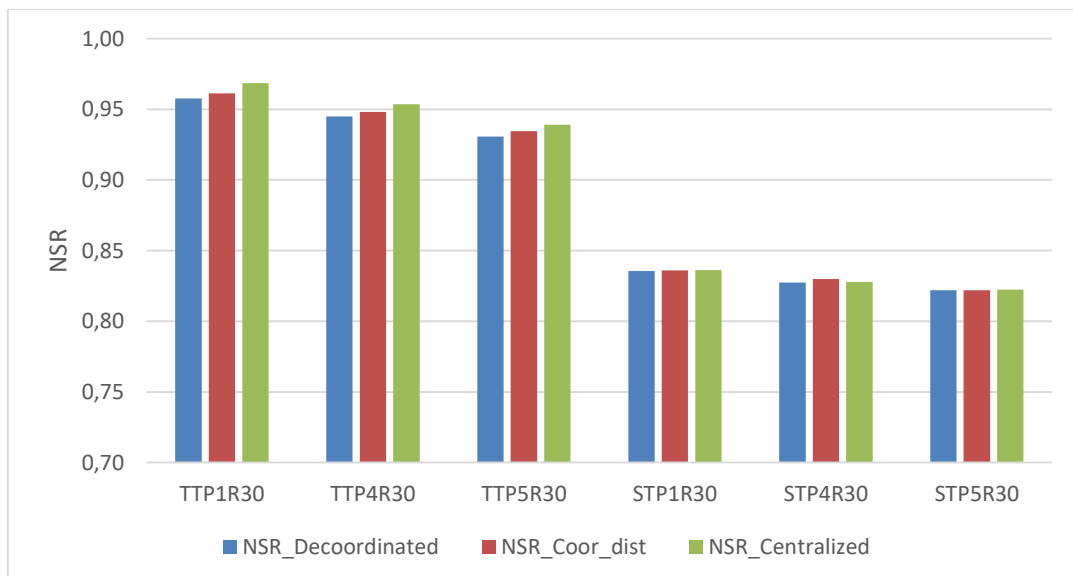
En la Figura 7-13 se pueden observar los promedios de los costes de los 52 periodos analizados de las planificaciones de las operaciones propuestas para las instancias agrupadas en distintos conjuntos de factores. Las instancias TTP1R30, TTP4R30 y TTP5R30 presentan mejoras en los promedios de costes con las propuestas de planificación con coordinación distribuida y planificación centralizada respecto de las planificaciones descentralizada-descoordinada. Sin embargo, en las instancias STP1R30, STP4R30 y STP5R30 estas mejoras no se aprecian debido a las menores reducciones de costes. Conclusiones equivalentes se observan respecto de los niveles de servicio en la Figura 7-14.

Figura 7-13: Costes medidos totales de las instancias agrupadas en las diferentes planificaciones de operaciones propuestas.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 7-14: Niveles de servicio medios de las instancias agrupadas en las diferentes planificaciones de operaciones propuestas.



Fuente: Elaboración propia.

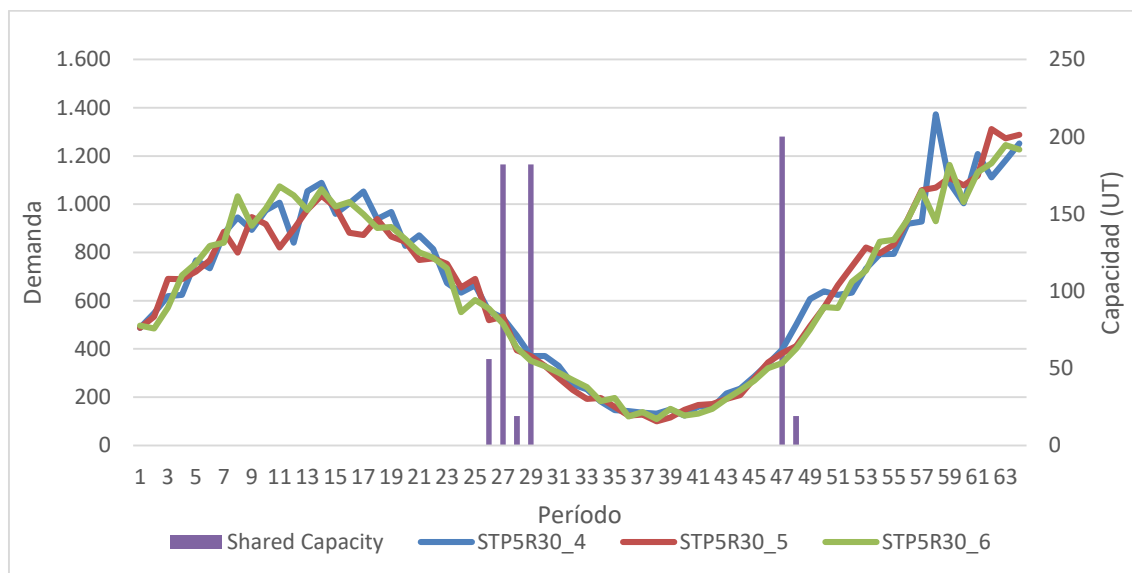
Se puede concluir que las propuestas de planificación con la coordinación distribuida presentadas tienen costes totales cercanos a los costes que se obtendrían con las planificaciones con coordinación centralizada, confirmando la hipótesis de este análisis. Conclusiones equivalentes presentan el análisis de los niveles de servicio. La coordinación distribuida facilita a las entidades compartir la capacidad de sus recursos afines y logra unos costes totales y niveles

de servicio afines a los que se obtendrían con una planificación con coordinación centralizada. Los resultados de todas las instancias están disponibles en el Anexo 3. En los siguientes dos apartados se analizan con detalle dos conjuntos de instancias coordinadas. En el Anexo 7, se pueden encontrar más conjuntos de instancias analizadas con detalle.

7.8 Análisis de las propuestas de planificación de las entidades STP5R30_4, STP5R30_5 y STP5R30_6 con coordinación distribuida

Las instancias STP5R30 son las que presentan los mayores costes en los 52 periodos analizados de las propuestas de planificación descentralizada-descoordinada según se ha observado en el capítulo anterior, tal y como se puede observar en la Figura 6-8, la Figura 6-9 y la Figura 6-18, por lo que se procede a su análisis más detallado. En las Figura 7-15 y Figura 7-16 se pueden observar los detalles del comportamiento de la entidad *STP5R30_4* que comparte su capacidad *R1* con *STP5R30_5* y *STP5R30_6*. En la Figura 7-15 se puede observar que las entidades comparten capacidades en los periodos con demanda intermedia. En los periodos de fuerte demanda las entidades utilizan sus capacidades para satisfacer sus propios requerimientos, por lo que ninguna puede ceder capacidad. En los periodos de baja demanda ninguna de las entidades tiene necesidad de capacidad extra. En los periodos con demandas intermedias son donde se pueden observar la capacidad compartida. En total las 3 entidades comparten capacidad en 6 de los periodos ejecutados.

Figura 7-15: Representación gráfica de la demanda agregada de los productos de las entidades STP5R30_4, 5, 6 y las capacidades compartidas entre entidades.

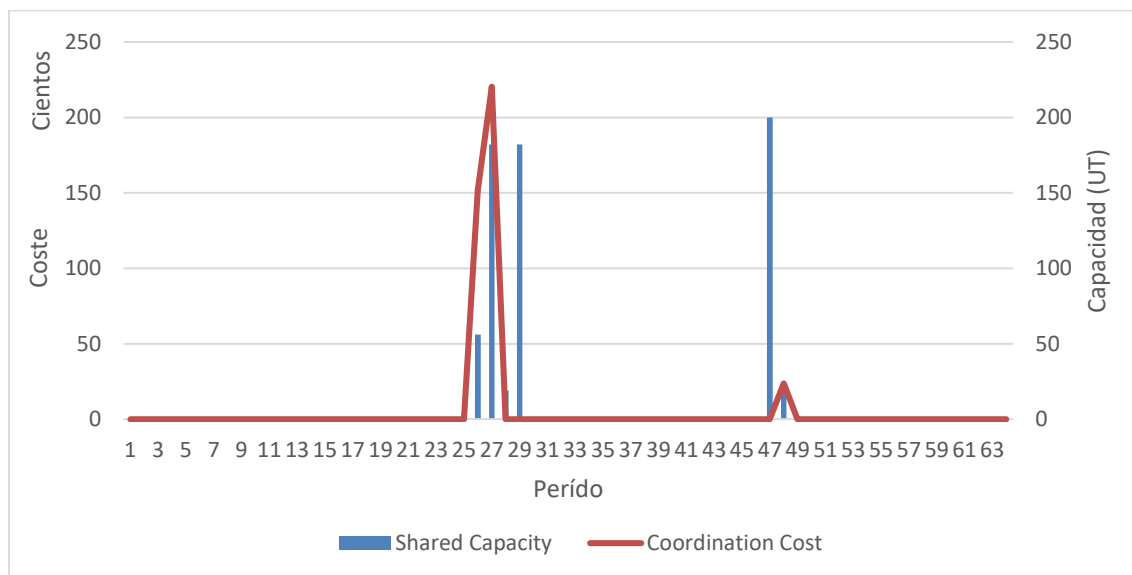


STP5R30_4 demanda estacional creciente, estructura producto P1, Recursos disponibles al 30%, instancia 4.
Fuente: Elaboración propia.

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

Si se observa la Figura 7-16, se puede apreciar que, en los periodos de baja demanda, la capacidad agregada de las 3 entidades es suficiente para las demandas puntuales, por lo que la compensación por el derecho de uso es nula. En los periodos 28, 29 y 47 se cede capacidad, pero las compensaciones son nulas. En el periodo 27 es donde se realizan las mayores compensaciones por el derecho de uso de los recursos compartidos, con demanda decreciente en las tres entidades.

Figura 7-16: Representación gráfica del recurso compartido en el periodo ejecutado y los intercambios de las compensaciones por los recursos compartidos entre las entidades STP5R30_4, 5, 6.



Shared Capacity, recursos compartidos entre las entidades; *Coordination Cost*, compensación realizada entre entidades por los recursos compartidos. Fuente: Elaboración propia.

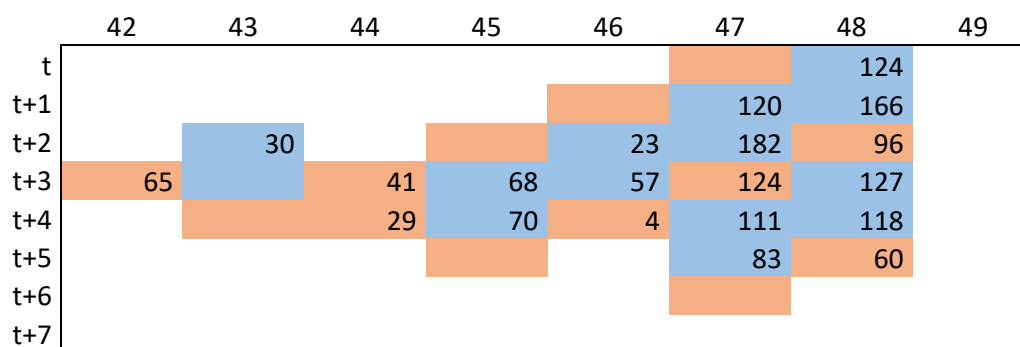
La Tabla 7-5 muestra las compensaciones por unidad de los recursos compartidos que se han establecido por la entidad STP5R30_4 con las otras entidades STP5R30_5 y STP5R30_6. Las compensaciones pueden encontrarse en los 8 periodos planificados en cada uno de los tramos en los que se planifica. En la tabla se presentan las compensaciones unitarias de los tramos en los que se planifica para los periodos entre el periodo 42 y el periodo 49. Las compensaciones sombreadas de azul identifican los periodos en los cuales la entidad prevé ceder capacidad y con el sombreado en naranja los periodos en los que la entidad prevé necesitar una capacidad superior a la de su recurso propio. La fila identificada con *t* recopila las compensaciones por unidad de los periodos que se ejecutan y el resto de filas son los datos relacionados con los siguientes periodos en ese tramo en el que se planifica. Las compensaciones con valor 0 no aparecen en la tabla.

Se puede observar de la Tabla 7-5 que las entidades han definido tanto las compensaciones por el uso de las capacidades en el periodo en el que se ejecutan las operaciones, el primer periodo, como las compensaciones previstas en los siguientes periodos en cada tramo en el que se planifica. Por lo tanto, las compensaciones previstas alientan a las entidades a trasladar operaciones a periodos en los que las compensaciones sean menores. Las compensaciones

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

aumentan cuando aumentan los requerimientos de capacidad de los recursos compartidos. Esta variación en las operaciones se refleja en las compensaciones fijadas en cada tramo en el que se planifica. En los periodos de mayor requerimiento aumentan las compensaciones para que las operaciones sean trasladadas a periodos de menor compensación. En el total de periodos ejecutados, 64 periodos, las entidades comparten capacidades en 6 periodos, pero solo en 3 de esos periodos se fijan compensaciones unitarias. En 3 de los periodos ejecutados, las capacidades se comparten sin compensaciones unitarias por el derecho de utilizarlas.

Tabla 7-5: Compensaciones unitarias por el derecho de uso de los recursos compartidos de la entidad STP5R30_4



Sombreado naranja los periodos previstos de coordinación en los que se requiere capacidad de otra entidad, sombreado azul los periodos previstos de coordinación en los que se cede capacidad a las otras entidades y las cifras son las compensaciones unitarias. Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 7-6, se presentan los costes totales de los 52 periodos de análisis de las instancias STP5R30_4, STP5R30_5 y STP5R30_6. Se observa que la suma de los costes de las propuestas de planificación del periodo a ejecutar con coordinación distribuida para las tres instancias no se reduce con respecto a los costes de las propuestas de planificación descentralizada-descoordinada. La suma de costes de las propuestas de planificación con coordinación distribuida es mayor que los costes de la propuesta de planificación con coordinación centralizada y descentralizada-descoordinada. Si se observan las entidades por separado, no todas ellas consiguen una reducción de costes. La instancia STP5R30_5 y STP5R30_6 presenta costes superiores con la planificación con coordinación distribuida que con la propuesta de planificación descentralizada-descoordinada. Pero debe recordarse que la entidad, STP5R30_5, ha conseguido capacidad de las otras entidades en 3 periodos y ha cedido capacidad en 3 periodos. La propuesta de planificación con coordinación distribuida de la instancia STP5R30_5 cede capacidad en 2 periodos sin ninguna compensación y en un periodo obtiene capacidad extra sin tener que soportar ningún sobrecoste. La entidad realiza una compensación total de 6.837 u.m. para lograr capacidad de 2 periodos y recibe una compensación de 811 u.m. por el periodo que cede capacidad, dando un saldo de 6.204 u.m. Por lo tanto, aunque inicialmente la entidad asimilada a la instancia STP5R30_5 pudiera no estar interesada en la coordinación distribuida, por el incremento de costes calculados, esta coordinación le permite compartir capacidades y la diferencia es inferior al 2%. En la Figura 7-17 se pueden observar los periodos en los que la entidad prevé requerir capacidad, sombreados en naranja y los periodos en los que prevé ceder capacidad, sombreado en azul en cada tramo en el que se planifica.

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

La Tabla 7-7 presentan los niveles de servicio de las mismas instancias con las diferentes propuestas de planificación de operaciones, sin observar una variación superior al 1% entre ellas, por lo que no se puede llegar a una conclusión en ningún sentido.

Tabla 7-6: Costes totales de los 52 periodos analizados de las instancias STP5R30_4, STP5R30_5, STP5R30_6

	Coste total 52 periodos descentralizada-descoordinadas	Coste total Coordinación distribuida	Compensaciones	Coste total 52 periodos Coordinación centralizada
STP5R30_4	76.828.251	75.441.069	-9.246	77.057.587
STP5R30_5	73.893.687	75.498.609	6.204	73.385.037
STP1R30_6	69.277.404	70.286.625	3.042	67.618.069
Sumatorio	219.999.342	221.226.303		218.060.692

Fuente: Elaboración propia.

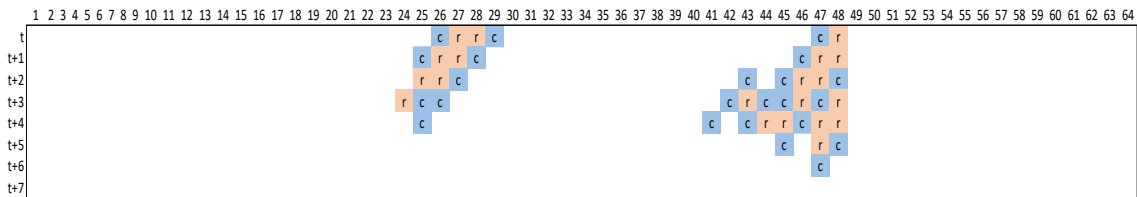
Tabla 7-7: Nivel de servicio de los 52 analizados de las instancias STP5R30_4, STP5R30_5 y STP5R30_6

	Nivel de servicio descentralizada-descoordinadas	Nivel de servicio Coordinación distribuida	Nivel de servicio Coordinación centralizada
STP5R30_4	0,82	0,82	0,82
STP5R30_5	0,83	0,83	0,82
STP5R30_6	0,83	0,83	0,83
Promedio	0,83	0,83	0,82

Fuente: Elaboración propia.

Se pueden observar en la Figura 7-18 las variaciones de la demanda en los 64 tramos en los que se planifica. En la Figura 7-18 se presenta cómo la demanda acumulada de los 10 productos finales varía en cada tramo en el que se planifica, lo que implica variaciones en la planificación para atender esos cambios. En la Figura 7-19 se puede observar cómo los valores de la función objetivo de la planificación con coordinación centralizada presenta en ciertos tramos en los que se planifica un mayor valor que los valores de la función objetivo obtenidos con la planificación descentralizada-descoordinada. Las variaciones imprevistas en la demanda no permiten en todos los casos que la propuesta de planificación con coordinación centralizada sea la solución más adecuada para el siguiente tramo en el que se planifica.

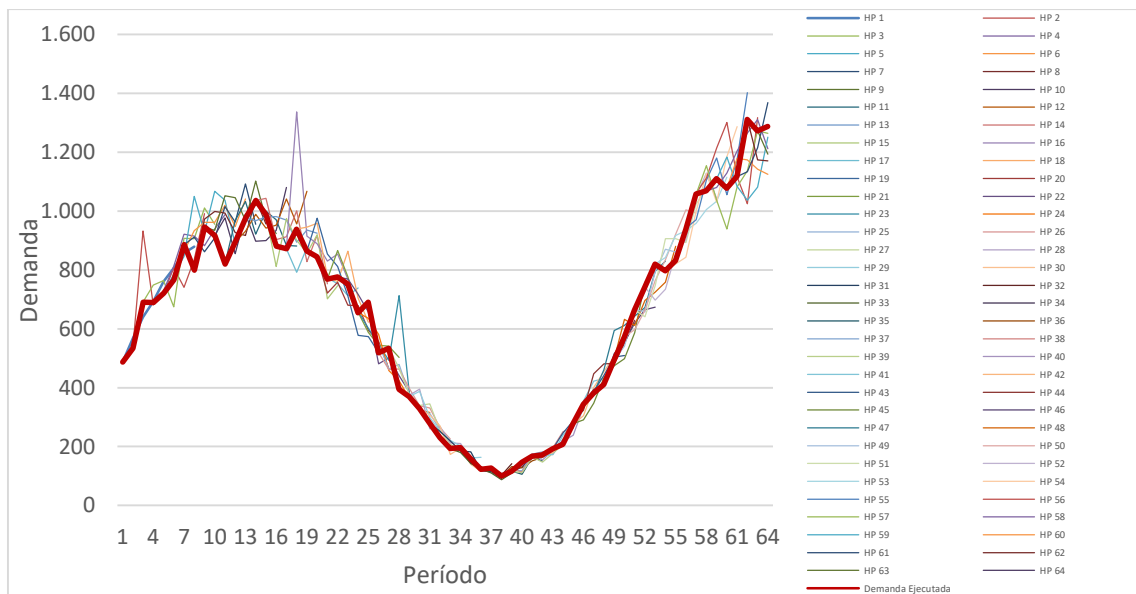
Figura 7-17: Periodos con cesión de capacidad en la planificación con coordinación distribuida de la instancia STP530_5 con las instancias STP5R30_4 y STP5R30_6



Sombreado naranja "r" los periodos previstos de coordinación en los que se requiere capacidad, sombreado azul "c" los periodos previstos de coordinación en los que se cede capacidad. Fuente: Elaboración propia.

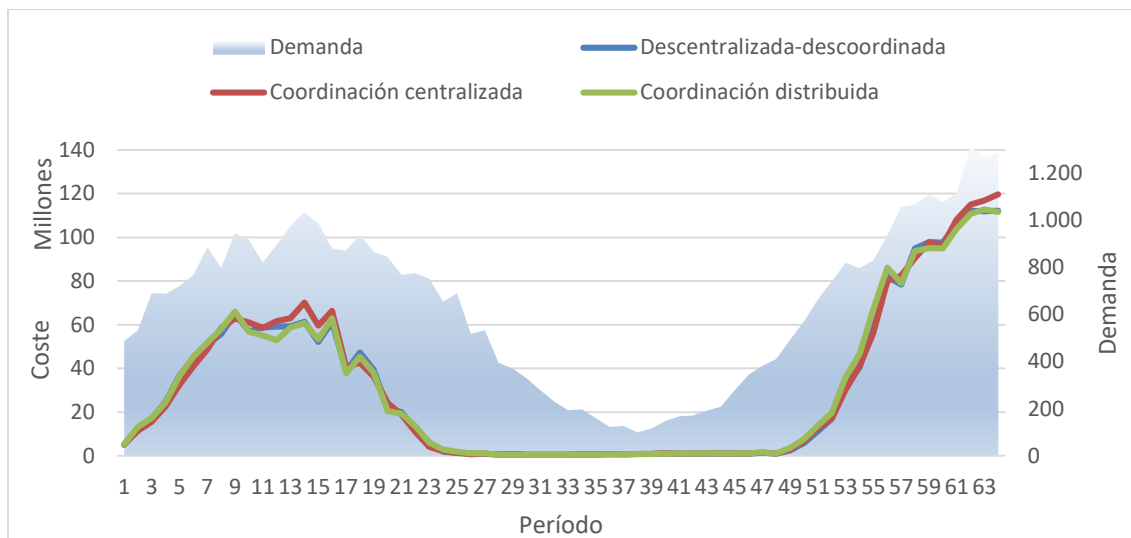
Por otro lado, en la Figura 7-17 se puede observar cómo en el periodo 49 no se comparte capacidad por haberse superado el valor unitario límite fijado en las penalizaciones unitarias. En la planificación del tramo del periodo 48 se preveía que en el periodo 49 esta entidad dispondría de capacidad extra procedente del resto de entidades. Esta capacidad no coordinada en el siguiente tramo en el que se planifica ha implicado incrementos de costes en la planificación con coordinación distribuida respecto de la planificación descentralizada-descoordinada. En la planificación centralizada si se comparte la capacidad en el periodo 49, tal y como se puede observar en la Figura 7-19, donde los valores de la función objetivo de la planificación con coordinación centralizada son inferiores que los valores de la función objetivo de la planificación descentralizada-descoordinada en los tramos en los que se planifica el periodo 49.

Figura 7-18: Evolución de la demanda de la instancia STP5R30_5 en cada tramo en el que se planifica frente a la demanda del periodo ejecutado



Fuente: Elaboración propia.

Figura 7-19: Evolución de los costes de la función objetivo en cada tramo en el que se planifica de la instancia STP5R30_5.



La función objetivo es la suma de los costes de los ocho periodos. Fuente: Elaboración propia.

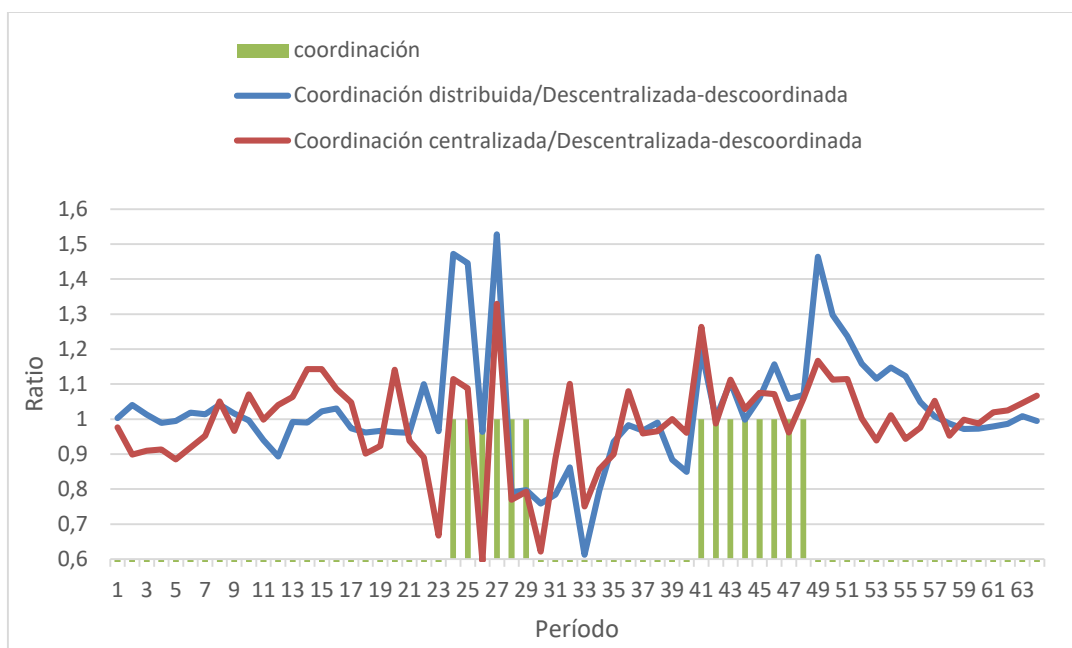
En la Figura 7-20 se puede observar cómo la heurística del procedimiento de horizontes rodantes genera diferentes propuestas de planificación de operaciones entre la coordinación distribuida y la planificación descentralizada-descoordinada dentro del gap admitido, que a partir del horizonte 10 presentan destacables diferencias de costes en la función objetivo. Ambas deberían tener planificación de operación con valores en la función objetivo dentro del gap admitido, al menos hasta el tramo en el que se planifica el periodo 24, en la previsión para el periodo 27 como se puede apreciar en la Figura 7-17, cuando aparece la primera cesión de capacidades. Pero, se observan diferencias destacables entre los valores que toman las funciones objetivo desde el primer periodo. Como se ha comentado, las diferentes alternativas que se pueden calcular dentro de la tolerancia admitida, en cada tramo en el que se planifica, pueden generar diferencias importantes en los siguientes tramos en los que se planifica.

Por otro lado, se puede observar en la Figura 7-20 cómo la planificación con coordinación centralizada tiene menores costes en los tramos en los que se planifica para los periodos 49 a 57 con respecto a la planificación con coordinación distribuida. Pero, la planificación con coordinación distribuida presenta mayores costes con respecto a la planificación descentralizada-descoordinada, ya que se previó una cesión de capacidad que no se llevó a cabo en el periodo 49, debido a los elevados valores de los multiplicadores de Lagrange. En este caso, la limitación de los multiplicadores de Lagrange de no superar un umbral para que se compartan recursos ha perjudicado a la entidad STP5R30_5. Esta entidad ha cedido recursos en el periodo previo con previsión de obtener recursos de las otras entidades en el periodo 49, pero al calcularse los multiplicadores en el periodo 49 por los recursos compartidos, estos superan el umbral, lo que implica que no se comparten los recursos.

De la Tabla 7-6 se observa que la diferencia de costes está alrededor del 2% entre las alternativas, por lo que debe asociarse estos peores resultados de la coordinación distribuida a

la heurística del procedimiento de horizontes rodantes, dado que las propuestas de planificación con coordinación distribuida permiten a las entidades poder compartir su capacidad sobrante sin tener que compartir toda la información que necesitaría una planificación con coordinación centralizada.

Figura 7-20: Relación de costes de la función objetivo de la planificación de operaciones de la instancias STP5R30_5 en cada tramo en el que se planifica respecto de la planificación descentralizada-descoordinada, frente a los tramos en los que se planifica con algún periodo en el que se comparta capacidad.

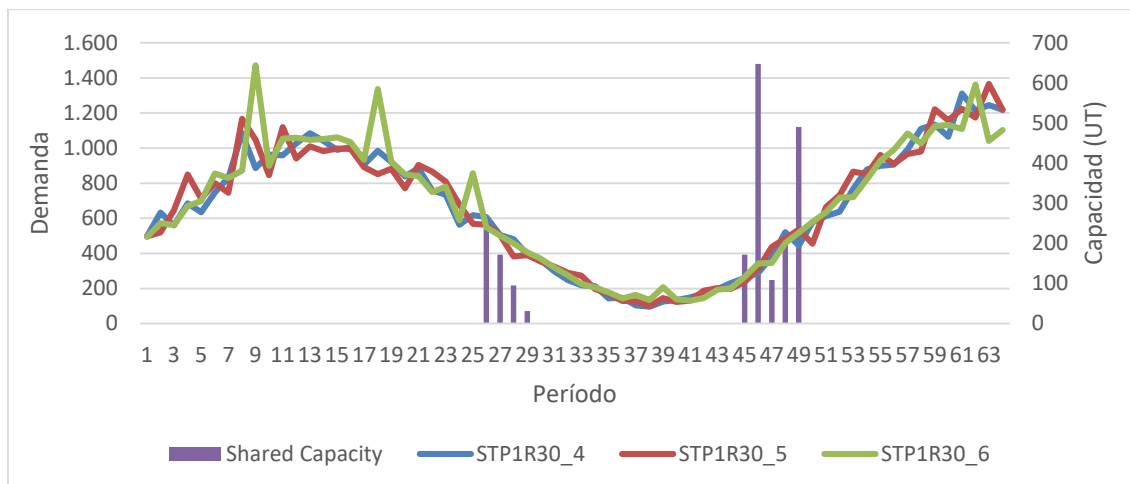


Fuente: Elaboración propia.

7.9 Análisis de las propuestas de planificación de las entidades STP1R30_4, STP1R30_5 y STP1R30_6 con coordinación distribuida

En las Figura 7-21 y Figura 7-22 se pueden observar los detalles del comportamiento de la entidad STP1R30_4 que comparte la capacidad de su recurso (R1) con STP1R30_5 y STP1R30_6. En la Figura 7-21 se puede observar que las entidades comparten capacidades en los periodos con demanda intermedia. En los periodos de fuerte demanda las entidades utilizan sus capacidades para satisfacer sus propias demandas, por lo que ninguna puede ceder capacidad. En los periodos de baja demanda ninguna de las entidades tiene necesidad de capacidad extra. Además, se puede observar que, en periodos con demanda decreciente, las entidades parten de situaciones de stock más holgadas por lo que requieren de menos capacidad extra. En los periodos de demanda creciente es donde se puede observar la mayor cantidad de capacidad compartida. En total las 3 entidades comparten capacidad en 9 de los periodos ejecutados.

Figura 7-21: Representación gráfica de la demanda agregada de los productos de las entidades STP1R30_4, 5, 6 y las capacidades compartidas entre entidades.

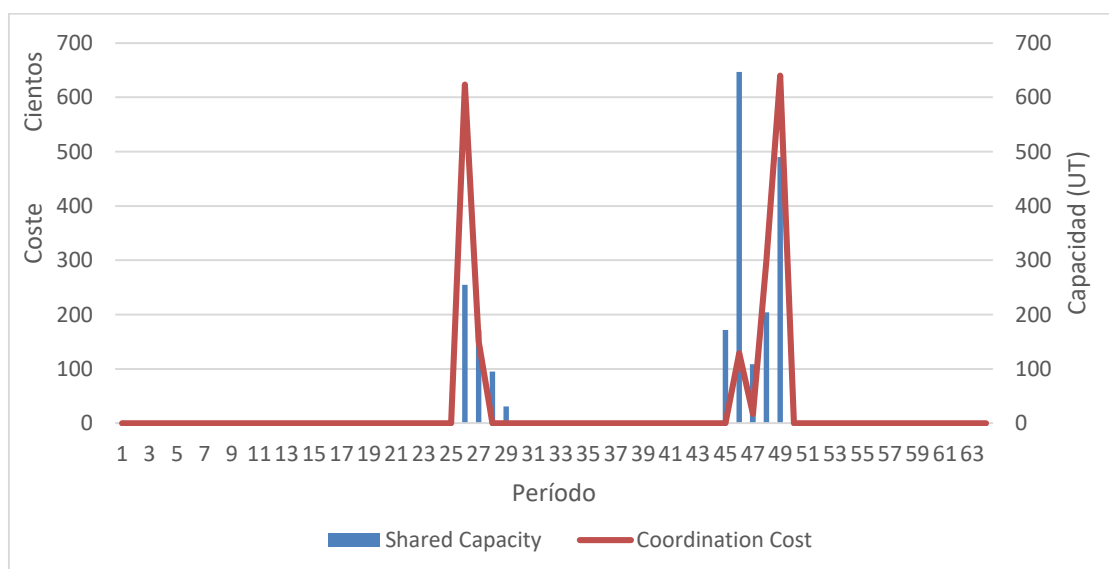


STP1R30_4 demanda estacional creciente, estructura producto P1, Recursos disponibles al 30%, instancia 4.

Fuente: Elaboración propia.

Si se observa la Figura 7-22, se puede apreciar que la capacidad agregada de las tres entidades es suficiente para demandas puntuales en los periodos de baja demanda, por lo que la compensación por el derecho de uso es 0. En los periodos 28, 29 y 45 se cede capacidad, pero las compensaciones son nulas. En el periodo 49 es donde se realizan las mayores compensaciones por el derecho de uso de los recursos compartidos, con demanda creciente en las 3 entidades. La situación es cercana a las compensaciones por el derecho de uso de los recursos compartidos en el periodo 26, con demandas altas en las 3 entidades.

Figura 7-22: Representación gráfica del recurso compartido en el periodo ejecutado y los intercambios de las compensaciones por los recursos compartidos entre las entidades STP1R30_4, 5, 6.



Shared Capacity, recursos compartidos entre las entidades; Coordination Cost, compensación realizada entre entidades por los recursos compartidos. Fuente: Elaboración propia.

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

La Tabla 7-8 muestra las compensaciones por unidad de los recursos compartidos que se han establecido por la entidad STP1R30_4 con las otras entidades STP1R30_5 y STP1R30_6. Las compensaciones pueden encontrarse en los 8 periodos planificados en cada uno de los tramos en los que se planifica. En la tabla se presentan las compensaciones unitarias de los tramos en los que se planifica para los periodos entre el periodo 42 y el periodo 49. Las compensaciones sombreadas de azul identifican los periodos en los cuales la entidad prevé ceder capacidad y con el sombreado en naranja los periodos en los que la entidad prevé necesitar una capacidad superior a la de sus recursos propios. La fila identificada con t recopila las compensaciones por unidad de los periodos que se ejecutan y el resto de filas son los datos relacionados con los siguientes periodos en ese tramo en el que se planifica. Las compensaciones con valor 0 no aparecen en la tabla.

Se puede observar de la Tabla 7-8 que las entidades han definido tanto las compensaciones por el uso de las capacidades en el periodo en el que se ejecutan las operaciones, el primer periodo, como las compensaciones previstas en los siguientes periodos en cada tramo en el que se planifica. Por lo tanto, las compensaciones previstas alientan a las entidades a trasladar operaciones a periodos en los que las compensaciones sean menores. Las compensaciones aumentan cuando aumentan los requerimientos de capacidad de los recursos compartidos. Esta variación en las operaciones se refleja en las compensaciones fijadas en cada tramo en el que se planifica. En los periodos de mayor requerimiento aumentan las compensaciones para que las operaciones sean trasladadas a periodos de menor compensación. En el total de periodos ejecutados, 64 periodos, las entidades comparten capacidades en 9 periodos, pero solo en 6 de esos periodos se fijan compensaciones unitarias. En 3 de los periodos ejecutados, las capacidades se comparten sin compensaciones unitarias por el derecho de utilizarlas.

Tabla 7-8 : Compensaciones unitarias por el derecho de uso de los recursos compartidos de la entidad STP1R30_4

	42	43	44	45	46	47	48	49
t					20	16	147	131
$t+1$			11	10	44	49	129	124
$t+2$			2	5	53	25	103	
$t+3$				10	11	32	87	
$t+4$							79	66
$t+5$							56	43
$t+6$								
$t+7$								

Sombreado naranja los periodos previstos de coordinación en los que se requiere capacidad de otra entidad, sombreado azul los periodos previstos de coordinación en los que se cede capacidad a las otras entidades y las cifras son las compensaciones unitarias. Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 7-9, se presentan los costes totales de los 52 periodos de análisis de las instancias STP1R30_4, STP1R30_5 y STP1R30_6. Se observa que la suma de los costes de las propuestas de planificación del periodo a ejecutar con coordinación distribuida para las tres instancias se reduce con respecto a los costes de las propuestas de planificación descentralizada-descoordinada. La suma de costes de las propuestas de planificación con coordinación

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

distribuida es menor que los costes de la propuesta de planificación con coordinación centralizada. Pero si se observan las entidades por separado, no todas ellas consiguen una reducción de costes. La instancia STP1R30_5 presenta costes superiores con la planificación con coordinación distribuida y con la planificación con coordinación centralizada que con la propuesta de planificación descentralizada-descoordinada. Pero debe recordarse que la entidad, STP1R30_5, ha conseguido capacidad de las otras entidades en 3 periodos y ha cedido capacidad en 6 periodos. La propuesta de planificación con coordinación distribuida de la instancia STP1R30_5 cede capacidad en 2 periodos sin ninguna compensación y en 1 periodo obtiene capacidad extra sin tener que soportar ningún sobrecoste. La entidad percibe una compensación total de 59.938 u.m. para reducir sus costes. Por lo tanto, aunque inicialmente la entidad asimilada a la instancia STP1R30_5 pudiera no estar interesada en la coordinación distribuida o en la coordinación centralizada, por el incremento de costes calculados, esta coordinación le permite compartir capacidades y la diferencia es inferior al 2,52%. En la Figura 7-23 se pueden observar los periodos en los que la entidad prevé requerir capacidad, sombreados en naranja y los periodos en los que prevé ceder capacidad, sombreado en azul en cada tramo en el que se planifica.

La Tabla 7-10 presentan los niveles de servicio de las mismas instancias con las diferentes propuestas de planificación de operaciones, sin observar una ellas, por lo que no se puede llegar a una conclusión en ningún sentido.

Tabla 7-9: Costes totales de los 52 periodos analizados de las instancias STP1R30_4, STP1R30_5, STP1R30_6

	Coste total 52 periodos descentralizada-descoordinadas	Coste total Coordinación distribuida	Compensaciones	Coste total 52 periodos Coordinación centralizada
STP1R30_4	63.525.363	61.762.080	-72.311	60.939.399
STP1R30_5	62.088.659	63.650.293	-59.938	62.325.850
STP1R30_6	63.637.198	60.699.475	132.249	59.147.473
Sumatorio	189.251.220	186.111.848		182.412.722

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7-10: Nivel de servicio de los 52 analizados de las instancias STP1R30_4, STP1R30_5 y STP1R30_6

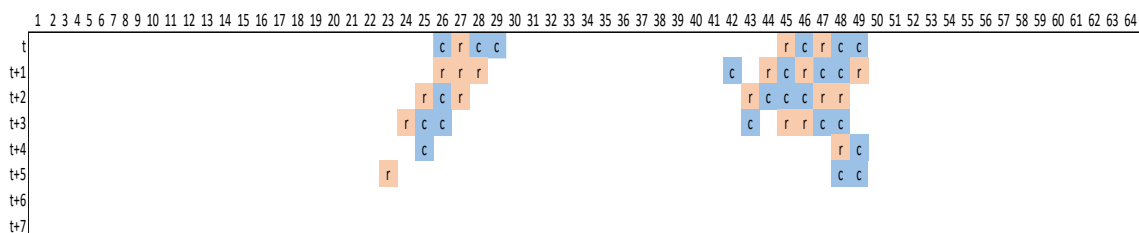
	Nivel de servicio descentralizada-descoordinadas	Nivel de servicio Coordinación centralizada	Nivel de servicio Coordinación distribuida
STP1R30_4	0,83	0,83	0,84
STP1R30_5	0,83	0,83	0,83
STP1R30_6	0,82	0,83	0,84
Promedio	0,83	0,83	0,83

Fuente: Elaboración propia.

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

Se debe recordar que los cálculos son realizados con la heurística del procedimiento de horizontes rodantes, con 8 periodos en cada horizonte de planificación, ejecutándose solo el primer periodo, con incertidumbre en la demanda y con un gap del 1% en el cálculo de cada uno de los 64 tramos en los que se planifica, para comparar con las diferencias encontradas en los costes totales de las diferentes propuestas de planificación. Se pueden observar en la Figura 7-24 las variaciones de la demanda en los 64 tramos en los que se planifica. En la Figura 7-24 se presenta como la demanda acumulada de los 10 productos finales va variando en cada tramo en el que se planifica, implicando variaciones en la planificación de las operaciones cuando se dispone de capacidad. En la Figura 7-25 se pueden observar cómo los valores de la función objetivo de la planificación con coordinación centralizada de cada tramo en el que se planifica presenta en ciertos tramos en los que se planifica un mayor valor que los valores de la función objetivo obtenidos con la planificación descentralizada-descoordinada. Las variaciones imprevistas en la demanda no permiten en todos los casos que la propuesta de planificación con coordinación centralizada sea la solución más adecuada para el siguiente tramo en el que se planifica.

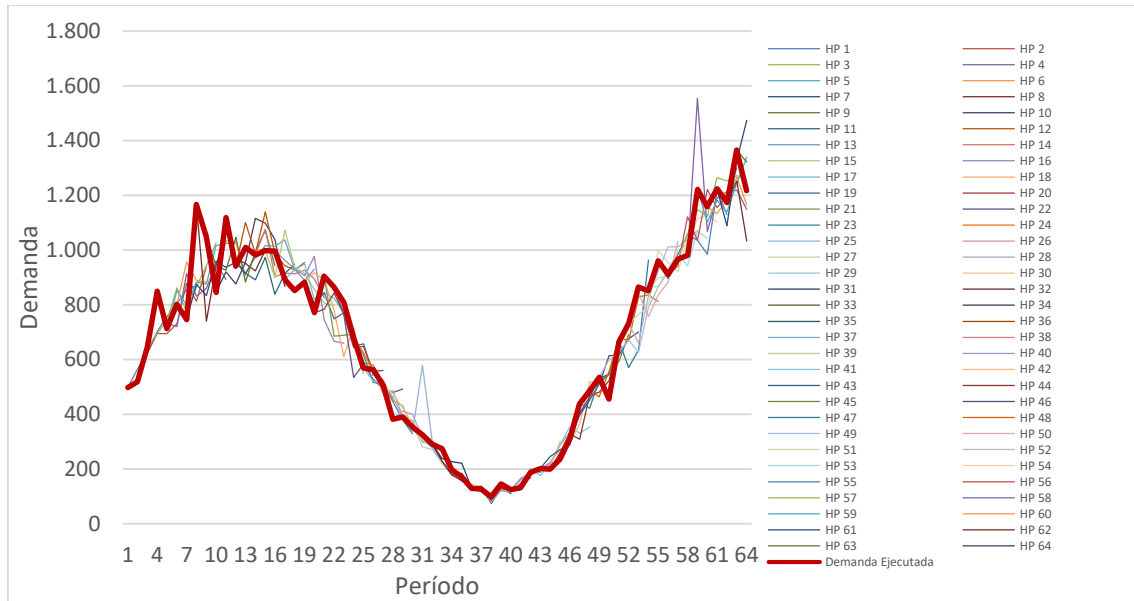
Figura 7-23: Periodos con cesión de capacidad en la planificación con coordinación distribuida de la instancia STP130_5 con las instancias STP1R30_4 y STP1R30_6



Sombreado naranja "r" los periodos previstos de coordinación en los que se requiere capacidad, sombreado azul "c" los periodos previstos de coordinación en los que se cede capacidad. Fuente: Elaboración propia.

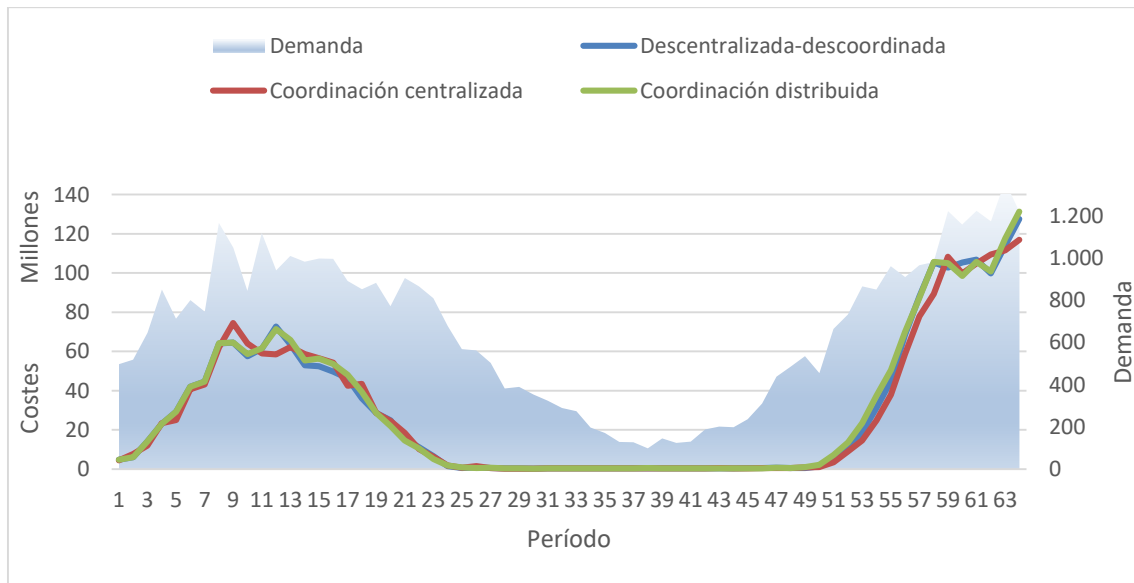
Por otro lado, en Figura 7-23 se puede observar cómo en el periodo 50 no se comparte capacidad por haberse superado el valor unitario límite fijado en las penalizaciones unitarias. En la planificación del tramo en el que se planifica del periodo 49 se preveía que en el periodo 50 esta entidad dispondría de capacidad extra procedente del resto de entidades. Esta capacidad no coordinada en el siguiente tramo en el que se planifica ha implicado incrementos de costes en la planificación con coordinación distribuida respecto de la planificación descentralizada-descoordinada. En la planificación centralizada si se comparte la capacidad en el periodo 50, tal y como se puede observar en la Figura 7-25, donde los valores de la función objetivo de la planificación con coordinación centralizada son inferiores que los valores de la función objetivo de la planificación descentralizada-descoordinada en los tramos en los que se planifica del periodo 50.

Figura 7-24: Evolución de la demanda de la instancia STP1R30_5 en cada tramo en el que se planifica frente a la demanda del periodo ejecutado



Fuente: Elaboración propia.

Figura 7-25: Evolución de los costes de la función objetivo en cada tramo en el que se planifica de la instancia STP1R30_5.



La función objetivo es la suma de los costes de los ocho periodos. Fuente: Elaboración propia.

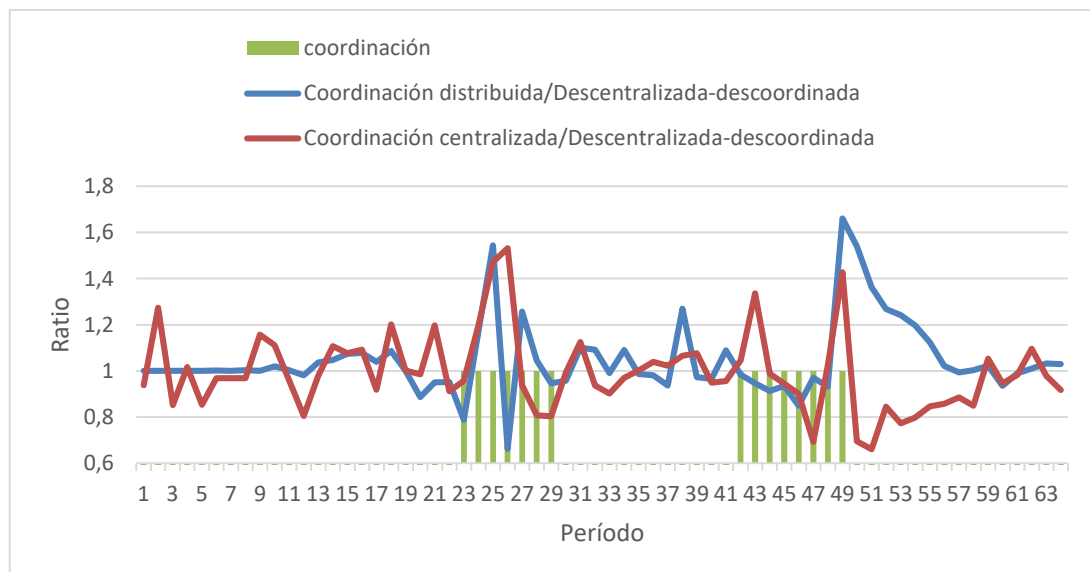
En la Figura 7-26 se puede observar cómo la heurística del procedimiento de horizontes rodantes genera diferentes propuestas de planificación de operaciones entre la coordinación distribuida y la planificación descentralizada-descoordinada dentro del gap admitido, que a partir del periodo 10 presentan destacables diferencias de costes en la función objetivo. Ambas planificaciones deberían tener planificación de operaciones equivalentes y con valores en la función objetivo parecidos dentro del gap admitido, al menos hasta el tramo en el que se

planifica el periodo 23, cuando aparece la primera previsión de cesión de capacidad para el periodo 28 que se puede apreciar en la Figura 7-23 (periodo 23 en previsión para el periodo 28). Pero, se observan diferencias destacables entre los valores que toman las funciones objetivo a partir del periodo 10. Las diferentes alternativas que se pueden calcular dentro de la tolerancia admitida, en cada tramo en el que se planifica, pueden generar diferencias importantes en los siguientes tramos en los que se planifica.

Por otro lado se puede observar en la Figura 7-25 cómo la planificación con coordinación centralizada tiene menores costes en los tramos en los que se planifica para los periodos 50 hasta el 59 respecto de la planificación descentralizada-descoordinada. Pero, la planificación con coordinación distribuida presenta mayores costes frente a la planificación descentralizada-descoordinada, ya que se previó una cesión de capacidad que no se realizó en el periodo 50, por los elevados valores de los multiplicadores de Lagrange. En este caso, la limitación de los multiplicadores de Lagrange de no superar un umbral para que se compartan recursos ha perjudicado a la entidad STP1R30_5. Esta entidad ha cedido recursos en el periodo previo con previsión de obtener recursos de las otras entidades en el periodo 50, pero al calcularse los multiplicadores en el periodo 50 por los recursos compartidos, estos superan el umbral, lo que implica que no se comparten los recursos.

De la Tabla 7-9 se observa que el incremento de costes no supera 2,17% entre las alternativas, por lo que debe asociarse estos peores resultados a la heurística del procedimiento de horizontes rodantes, dado que las propuestas de planificación con coordinación distribuida permiten a las entidades poder compartir su capacidad sobrante sin tener que compartir toda la información que se necesitaría en una planificación con coordinación centralizada.

Figura 7-26: Relación de costes de la función objetivo de la planificación de operaciones de la instancias STP1R30_5 en cada tramo en el que se planifica respecto de la planificación descentralizada-descoordinada, frente a los tramos en los que se planifica con algún periodo en el que se comparta capacidad.



Fuente: Elaboración propia.

7.10 Planificación con coordinación distribuida donde una de las entidades tiene un comportamiento oportunista

Con el fin de completar el análisis de la propuesta de planificación con coordinación distribuida, se evalúan posibles comportamientos oportunistas de alguna de las entidades. El análisis de las consecuencias de las actuaciones que buscan posibles mejoras locales sin interesarse por las consecuencias globales, permite evitarlos (Vitasek et al., 2013). Se identifican dos posibles situaciones.

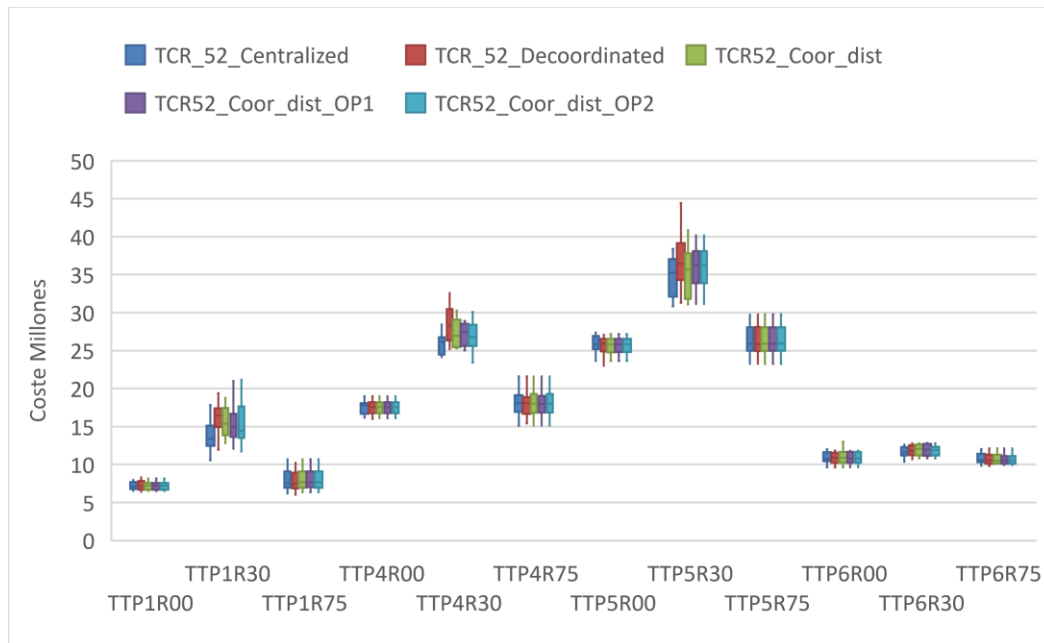
La primera situación de comportamiento oportunista, que se va a simular, es cuando las entidades que tengan capacidad disponible para compartir, decidan no informar de la disponibilidad total de la misma. Esta situación reduce la capacidad disponible para compartir entre las entidades. La reducción de los recursos compartidos debería provocar el encarecimiento del multiplicador de Lagrange para poder llegar al punto de equilibrio. Por lo tanto, la hipótesis que se desea analizar es si el comportamiento oportunista tiene consecuencias en los costes totales y en el nivel de servicio, en la entidad y en el conjunto de entidades que están compartiendo capacidad.

Para realizar la simulación, se establece que la segunda entidad reduce en un 20% la capacidad sobrante del recurso compartido que informa a las otras entidades como disponible. Esta selección implica que se abre una línea para futuras investigaciones en determinar la relación entre el nivel de reducción planteado o el número de entidades que reducen sus recursos y las consecuencias generadas.

En la Figura 7-27 se puede observar que la reducción del 20% no produce consecuencias apreciables en algunas de las posibles combinaciones y sí en otras situaciones. Se destaca que aquellas instancias que tienen un mayor número de periodos en los que se realiza la coordinación, que se puede apreciar en la Figura 7-10, presentan mayores cambios entre la planificación con coordinación distribuida respecto de la planificación con coordinación distribuida con esta primera opción de comportamiento oportunista. Se destacan las instancias TTP1R30, TTP4R30 y TTP5R30.

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

Figura 7-27: Representación gráfica comparativa de la distribución de los costes totales de los 52 periodos analizados respecto de las distintas propuesta de planificación.



TCR_52_Decordinated costes totales de los 52 periodos de análisis de cada instancia, TCR_52_Centralized costes totales de cada instancia cuando se ha compartido el primer recurso entre tres entidades y han realizado una coordinación centralizada, TCR52_Coor_dist mediante la coordinación distribuida propuesta, TCR52_Coor_dist_OP1, la primera entidad oculta capacidad sobrante, TCR52_Coor_dist_OP2 la primera entidad oculta reducciones de costes que obtiene cuando le ceden recursos. Fuente: Elaboración propia.

Si se comparan los costes totales de los 52 periodos analizados de cada entidad, según las diferentes propuesta de planificación obtenidas, se puede observar cómo este comportamiento oportunista de la segunda entidad, identificado en la Tabla 7-11 con (*Op1*), le permite reducir sus costes totales respecto de los costes de la planificación con coordinación distribuida o la planificación descentralizada-descoordinada y encarecer los costes de una de las otras entidades. Este comportamiento además provoca un incremento de los costes conjuntos de las tres entidades respecto de la coordinación distribuida, que no llega a los costes de la planificación descentralizada-descoordinada. La entidad que oculta capacidad consigue menores costes, pero incrementa los costes del conjunto. Esta capacidad no compartida por la segunda entidad le permite realizar operaciones ante variaciones en la demanda y evitar posibles penalizaciones por demora. Equivalentes observaciones se pueden decir del análisis de los niveles de servicio que se puede apreciar en la Tabla 7-12. En la Figura 7-28 se pueden observar los periodos en los que la entidad prevé requerir capacidad, equivalente a lo que se puede apreciar en la Figura 7-17 de la planificación con coordinación distribuida. Los resultados obtenidos de todas las instancias están disponibles en el Anexo 3.

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

Tabla 7-11: Comparativa costes con oportunismos

	Coste total 52 periodos descentralizada-descoordinadas	Coste total Coordinación distribuida	Coste total 52 periodos Coordinación centralizada	Coste total Coordinación distribuida Op1	Coste total Coordinación distribuida Op2
STP1R30_4	63.525.363	61.762.080	60.939.399	65.382.381	60.566.055
STP1R30_5	62.088.659	63.650.293	62.325.850	60.786.589	62.082.798
STP1R30_6	63.637.198	60.699.475	59.147.473	60.995.158	60.627.663
	189.251.220	186.111.848	182.412.722	187.164.129	183.276.516

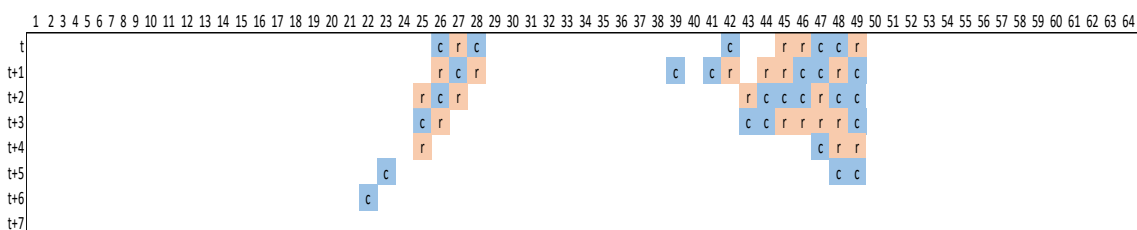
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7-12: Comparativa de niveles de servicio con oportunismos

	Nivel de servicio descentralizada-descoordinadas	Nivel de servicio Coordinación distribuida	Nivel de servicio Coordinación centralizada	Nivel de servicio Coordinación distribuida Op1	Nivel de servicio Coordinación distribuida Op2
STP1R30_4	0,83	0,83	0,84	0,82	0,84
STP1R30_5	0,83	0,83	0,83	0,84	0,83
STP1R30_6	0,82	0,83	0,84	0,83	0,83
	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83

Fuente: Elaboración propia.

Figura 7-28: Periodos con cesión de capacidad en la planificación con coordinación distribuida con la primera opción analizada de oportunismo de la instancia STP130_5 con las instancias STP1R30_4 y STP1R30_6



Sombreado naranja los periodos previstos de coordinación en los que se requiere capacidad de otra entidad, sombreado azul los periodos previstos de coordinación a los que se cede capacidad a las otras entidades. Fuente: Elaboración propia.

La segunda situación de comportamiento oportunista que se va a simular es cuando las entidades informan a las otras entidades que su variación de costes con la coordinación es menor que la que realmente conseguirían. De tal manera que las entidades no informan de la totalidad de la reducción de costes que obtendrían al disponer de mayor capacidad. La hipótesis que se desea analizar es si este comportamiento tiene consecuencias en los costes totales y en el nivel de servicio, en la entidad y en el conjunto de entidades que están compartiendo capacidad.

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

Para realizar la simulación, se establece que la segunda entidad reduce en un 20% la variación de costes totales que la entidad logra con la coordinación. Esta selección implica que se abre una línea para futuras investigaciones en determinar la relación entre el nivel de reducción planteado o el número de entidades que varían su reducción de costes y las consecuencias generadas.

Debe recordarse que la variación en costes totales para la actualización de los multiplicadores de Lagrange, está relacionada con los costes totales acumulados de los periodos incluidos en cada tramo en el que se planifica, donde en algunos periodos la entidad puede estar ofreciendo capacidad disponible a otras entidades y en otros periodos estar requiriendo capacidad de otra entidad.

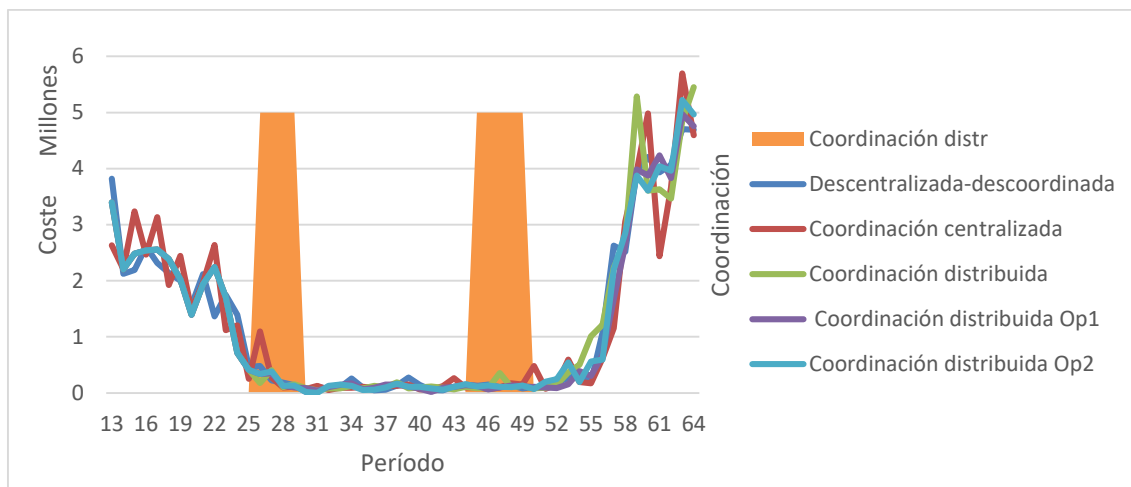
En la Figura 7-27, se puede observar que hay un marcado cambio de distribución de los costes totales en las instancias con más periodos con coordinación. Si se comparan los costes totales de cada entidad, según las diferentes propuestas de planificación obtenidas, se puede observar cómo este comportamiento oportunista de la segunda entidad, identificado en la Tabla 7-11 con (*Op2*,) tiene una reducción de costes respecto de la planificación descentralizada-descoordinada en la entidad que ha modificado sus costes, pero también una reducción de costes en las otras entidades y para el conjunto de las tres entidades mejores costes que los obtenidos de la planificación con coordinación distribuida y acercándose a la centralizada.

En la Figura 7-29, se pueden observar los periodos en los que hay intercambio de capacidad como sombreada. Dado que esta variación afecta al numerador en el cálculo de los multiplicadores de Lagrange por el método del subgradiente, se espera una reducción del valor de los multiplicadores de Lagrange. En la Figura 7-29 se representan los costes del periodo ejecutado para la instancia STP1R30_5 con las distintas formas de realizar la planificación de las operaciones. Los costes tanto con la planificación con coordinación distribuida, como con las dos opciones oportunistas analizadas son afines hasta el periodo 50. Después del periodo 50, los costes varían entre las distintas planificaciones encontrando un mayor coste en el periodo 59.

El último periodo donde se ha realizado intercambio de capacidad es en el periodo 49 que se puede apreciar en la Figura 7-30. En la Tabla 7-13 se pueden observar los valores que toma la función objetivo en los 64 tramos en los que se planifica. En esta tabla se puede observar cómo la planificación centralizada obtiene los menores costes.

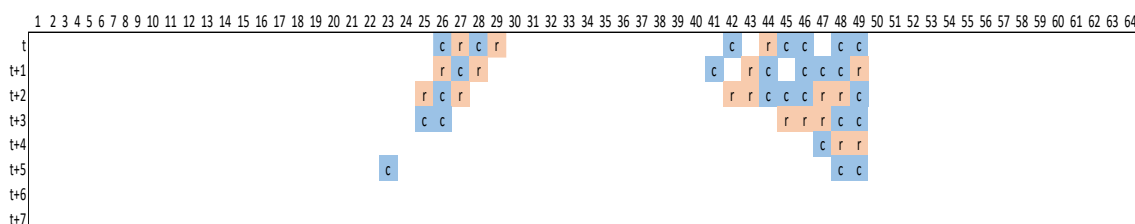
Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

Figura 7-29: Comparativa de costes del periodo ejecutado con la instancia STP1R30_5



TCR_52_Decoordinated costes totales de los 52 periodos de análisis de cada instancia, TCR_52_Centralized costes totales de cada instancia cuando se ha compartido el primer recurso entre tres entidades y han realizado una coordinación centralizada, TCR52_Coor_dist mediante la coordinación distribuida propuesta, TCR52_Coor_dist_OP1, la primera entidad oculta capacidad sobrante, TCR52_Coor_dist_OP2 la primera entidad oculta reducciones de costes que obtiene cuando le ceden recursos. Fuente: Elaboración propia.

Figura 7-30: Periodos con cesión de capacidad en la planificación con coordinación distribuida con la segunda opción analizada de oportunidad de la instancia STP130_5 con las instancias STP1R30_4 y STP1R30_6



Sombreado naranja los periodos previstos de coordinación en los que se requiere capacidad de otra entidad, sombreado azul los periodos previstos de coordinación en los que se cede capacidad a las otras entidades. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7-13: Valores de la función objetivo en los 64 tramos planificados

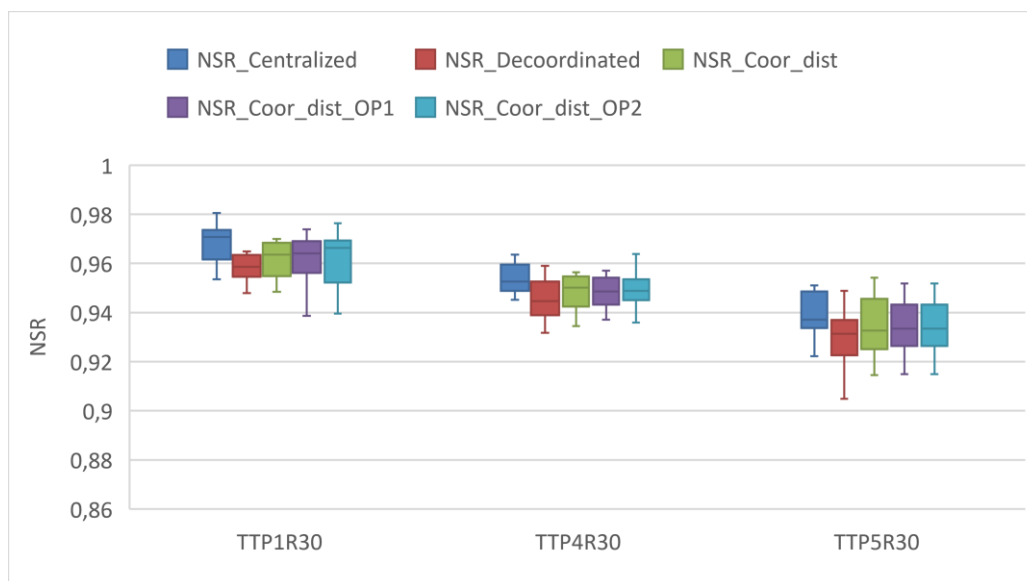
	Coste total de la función objetivo de los 64 periodos descentralizada-descoordinadas	Coste total de la función objetivo de los 64 periodos Coordinación centralizada	Coste total de la función objetivo de la Coordinación distribuida	Coste total de la función objetivo de la Coordinación distribuida Op1	Coste total de la función objetivo de la Coordinación distribuida Op2
STP1R30_4	1,851E+09	1,852E+09	1,882E+09	1,941E+09	1,828E+09
STP1R30_5	1,917E+09	1,863E+09	1,956E+09	1,918E+09	1,930E+09
STP1R30_6	1,919E+09	1,859E+09	1,876E+09	1,874E+09	1,838E+09
	5,69E+09	5,57E+09	5,71E+09	5,73E+09	5,60E+09

Fuente: Elaboración propia.

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

En la Figura 7-31 se puede observar cómo esta segunda opción oportunista puede afectar al nivel de servicio. En las instancias TTP1R30 aumentan las instancias con peor nivel de servicio respecto de la planificación con coordinación distribuida, en las instancias TTP4R30 se amplía el rango de niveles de servicio y en las instancias TTP5R30 se obtiene equivalentes resultados que con la primera opción oportunista.

Figura 7-31: Representación gráfica comparativa del nivel de servicio respecto de la coordinación distribuida oportunista de la primera y segunda opción.



NSR_Centralized nivel de servicio de cada instancia en los 52 periodos de análisis donde se ha buscado reducir los costes totales de las tres instancias que han compartido el primer recurso, *NSR-Decoordinated* nivel de servicio de los 52 periodos de análisis de cada instancia, *NSR_Coor_dist* mediante la coordinación distribuida propuesta, *NSR_Coor_dist_OP1*, la primera entidad oculta capacidad sobrante, *NSR_Coor_dist_OP2* la primera entidad oculta reducciones de costes que obtiene cuando le ceden recursos.

Fuente: Elaboración propia.

Como se ha verificado, ambas opciones oportunistas logran una mejora en los costes y el nivel de servicio en las entidades que realizan dichos comportamientos. Pero, estos comportamientos oportunistas generan un incremento de costes y un peor nivel de servicio en las otras entidades y en el conjunto de las tres entidades.

Para aplicar la coordinación distribuida presentada en este capítulo, se necesita transparencia tanto en la capacidad disponible de los recursos compartidos como en las reducciones de costes que se logran al disponer de mayor capacidad en las entidades. La alternativa es pre-establecer unos valores a los multiplicadores de Lagrange, coste unitario por la capacidad compartida, cercanos al máximo, para que no haya recalcule de los multiplicadores de Lagrange ni intercambio de información sobre costes. Solo se negociará que capacidad es la compartida. Se compartirá capacidad si alguna entidad tiene excedente y otra entidad necesita capacidad extra, a un coste unitario pre-establecido. Esta solución se aleja de la planificación con coordinación centralizada, pero mejorará respecto de una planificación descentralizada-descoordinada y

permite unos primeros pasos para generar confianza entre las entidades. Solo con la confianza es posible llegar a una sinceridad en los datos que necesita la coordinación (Vitasek et al., 2013).

7.11 Conclusiones y futuros trabajos

La coordinación distribuida de un recurso compartido mediante la fijación de una compensación interna ha sido analizada utilizando el procedimiento de horizontes rodantes, a partir de un banco de instancias. Los resultados trasladan una mejora media en los medibles de las entidades respectivas, sin tener que compartir información interna ni la necesidad de un agente centralizado independiente.

El procedimiento planteado permite compartir capacidad entre entidades independientes, sin ninguna prevalencia de poder entre las entidades, partiendo de una situación descentralizada-descoordinada. En el procedimiento de horizontes rodantes, el responsable de la planificación de operaciones busca en cada situación un plan que minimice sus costes para un horizonte limitado y móvil. El método de actualización de los multiplicadores de Lagrange por el subgradiente recogido por Fisher (2004) tiende a converger en las sucesivas iteraciones relajadas, aunque no logra obtener una propuesta de solución válida por su incumplimiento de las restricciones relajadas. El capítulo presenta un procedimiento para hacer cumplir las restricciones aprovechando la convergencia de las compensaciones unitarias, asegurando la capacidad para las necesidades internas de cada entidad y repartiendo la capacidad sobrante entre las entidades demandantes de mayor capacidad.

Las entidades compartirán sus recursos cuando alguna entidad necesite más capacidad y otra disponga de capacidad sobrante. La capacidad sobrante se puede generar por falta de demanda o porque se avanzaron operaciones para liberar cierta capacidad de los recursos. Este esfuerzo de avanzar operaciones se compensa con los menores costes generados en las otras entidades con esta capacidad disponible liberada. Pero, cuando las necesidades de cada entidad son tales que las variaciones de planificación impliquen grandes costes, se espera que las entidades se resistan a compartir recursos. Se ha visto que la coordinación ocurre en requerimientos intermedios y principalmente en periodos de mayor demanda, donde las entidades adelantan operaciones a cambio de las compensaciones de otras entidades. En periodos de baja demanda no se necesita compartir recursos y en los periodos de altas demandas las compensaciones necesarias superan el umbral fijado. Se reserva para futuras investigaciones evaluar las consecuencias de variar el límite establecido a las compensaciones unitarias que impliquen reticencias a la coordinación por las entidades.

El método planteado presenta coordinación con compensación cuando hay falta de recursos para las necesidades agregadas de las entidades, pero tiene una compensación nula en los casos que hay capacidad suficiente. Esta situación puede extrañar a las entidades que verán que en ciertas situaciones comparten capacidad con una compensación y en otras no obtienen compensación. Esta situación puede generar desconfianza en la relación, por lo que parece conveniente establecer una compensación mínima por el uso de los recursos ajenos. Esta

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

compensación mínima frenará, en ciertos casos, compartir capacidad, pero podría subsanar estas reticencias.

El método presentado ofrece un sistema para poder compartir o utilizar capacidad sobrante entre entidades. Además, las entidades pueden adelantar las operaciones cuando hay previsión de saturación de los recursos compartidos gracias a la previsión de compensaciones mayores en los periodos de mayor requerimiento de todas las entidades, como se puede observar en la Tabla 7-5.

Las propuestas de planificación con la coordinación distribuida presentadas logran costes totales de las CdS cercanos a los costes que se obtendrían con los esquemas de planificación con coordinación centralizada. La coordinación distribuida facilita a las entidades compartir la capacidad de sus recursos y lograr unos costes totales y niveles de servicio cercanos a los que se obtendrían con una planificación con coordinación centralizada.

Los experimentos se han llevado a cabo a partir de una selección de instancias del banco de instancias presentado en capítulos anteriores. Se reserva para futuras investigaciones analizar el comportamiento del nerviosismo en las entidades ante la planificación con coordinación distribuida, planificación con coordinación centralizada y planificación descentralizada-descoordinada, además de otras instancias disponibles en el banco de instancias.

En futuras investigaciones se podría analizar como los distintos parámetros que definen el procedimiento de horizontes rodantes afectan en la planificación de operaciones respecto de las distintas formas de coordinación.

Se ha podido verificar cómo las opciones oportunistas pueden conseguir mejoras en costes y nivel de servicio en las entidades que realizan dichos comportamientos. Pero, estos comportamientos oportunistas pueden generar un incremento en los costes y un peor nivel de servicio en las otras entidades y por lo tanto al conjunto de las tres entidades. Por lo que, para poder aplicar la coordinación distribuida presentada en este capítulo, es necesario compartir capacidad disponible que aliente la confianza y la colaboración en la transmisión de información veraz de la capacidad disponible y los costes ahorrados con la nueva capacidad disponible.

Capítulo 8: Conclusiones y líneas futuras

8.1 Introducción

En este último capítulo de la tesis se recogen las conclusiones alcanzadas tras la realización del trabajo. Para ello se considera adecuado resumir cada una de las conclusiones extraídas y las distintas líneas de investigación abiertas para próximos trabajos.

8.2 Resultados y conclusiones

A continuación, se sintetizan los principales resultados y conclusiones obtenidos:

- La revisión de la literatura científica ha permitido identificar carencias en las investigaciones existentes sobre los mecanismos de coordinación distribuidos entre las necesidades empresariales, su implantación y la literatura científica.
- Se han podido identificar los distintos procedimientos para la búsqueda de soluciones factibles de coordinación distribuida frente a la descoordinación en situaciones de capacidad disponible para compartir y sin la figura de un mediador de la literatura científica.
- No se ha identificado ningún trabajo que estudie los mecanismos de coordinación o de incentivos con estructura de producto con procesos alternativos, diferente a la estructura de producto Gozinto.
- Ha sido presentada la aplicación de la relajación de Lagrange en la formulación GMOP, permitiendo tanto resolver problemas complejos como la coordinación de subproblemas.
- Se ha podido observar como el método de actualización del multiplicador de Lagrange por el subgradiente tiende a una convergencia en los multiplicadores de Lagrange al aplicar el método recogido por Fisher (2004), en contraposición a las oscilaciones que presenta el método propuesto por Conejo et al. (2006) de actualización del paso.
- Se ha desarrollado un banco de instancias disponibles suficientemente amplio para la formulación GMOP.
- Se ha completado el conocimiento que cuando son necesarios más periodos para la realización de las distintas operaciones de un producto, el nerviosismo tipo I disminuye, pero el nerviosismo tipo II aumenta.
- Se ha presentado el protocolo para la generación de propuestas de coordinación distribuida sin la necesidad de un agente independiente o mediador y sin la necesidad de un agente con mayor poder en la relación, bajo la formulación GMOP.

- Se ha podido observar como el mecanismo de coordinación distribuido en entornos del procedimiento de horizontes rodantes bajo las combinaciones de instancias analizadas consigue acercarse a la coordinación centralizada tanto en los costes totales de los periodos ejecutados como en el nivel de servicio respecto de las propuestas de planificación sin compartir recursos.
- Se han identificado como los comportamientos oportunistas pueden generar beneficios locales, aunque peores resultados globales.

8.3 Futuras líneas de investigación

Algunas de las principales líneas de investigación futura, a partir de las limitaciones del trabajo realizado, se centran en:

- Relativas a los problemas donde se aplican los mecanismos de coordinación:

- Desarrollar mecanismos de coordinación distribuidos para resolver necesidades de colaboración en ámbitos estratégicos de la planificación.
- Diseñar mecanismos de coordinación en áreas de marketing con la formulación GMOP, donde el objetivo sería maximizar las ventas asumiendo que los costes de las operaciones e inventario son independientes de los precios.
- Analizar el comportamiento de los mecanismos de coordinación distribuido en la programación de las operaciones con estructuras dependientes y con alternativas aprovechando la versatilidad de la formulación GMOP.
- Diseñar e implementar una herramienta de coordinación distribuida para la optimización de la planificación de las operaciones incorporando variables con incertidumbre borrosa (fuzzy).

- Relativas a los multiplicadores de Lagrange y los mecanismos de coordinación:

- Avanzar en el desarrollo de otros procedimientos de actualización de los multiplicadores de Lagrange adaptados a las características específicas de la formulación GMOP.
- Desarrollar mecanismos de coordinación basados en subastas, jerárquicos, metaheurísticas y otras descomposiciones matemáticas con la formulación GMOP.

- Relativas al banco de instancias:

- Estudiar mecanismos de previsión de la demanda en relación al coste total, nerviosismo tipo uno y dos, como el nivel de servicio según los diferentes niveles de incertidumbre en la formulación GMOP, gracias al banco de instancias presentado.

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

- Analizar el comportamiento de la formulación GMOP en el procedimiento de horizontes rodantes basándose en las variables de diseño (PH, FI, RP, Lot Sizing rule) según el banco de instancias propuesto y los medibles presentados.
 - Desarrollar la formulación GMOP en el procedimiento de horizontes rodantes que incluya los costes asociados con la previsión de la demanda. Debe identificar el equilibrio entre las operaciones, los SKUs y los periodos de previsión de la demanda.
 - Analizar el comportamiento del procedimiento de horizontes rodantes con diferentes tolerancias en la aceptación de resultados validos en cada tramo en el que se planifica.
 - Analizar el comportamiento de otros posibles medibles, tal que se recoja el nerviosismo por los cambios acumulados de producto y por los totales de operaciones y preparación que se replanifican entre distintos tramos en los que se planifica.
 - Desarrollar y analizar procesos para reducir la simetría en el modelo GMOP dentro del procedimiento de horizontes rodantes.
 - Analizar propuestas de ponderación de las estructuras de costes respecto de la cercanía temporal a la toma de decisión en la planificación de las operaciones.
- Relativa a otro concepto.
- Desarrollar la coordinación a partir de protocolos de colaboración estratégicos como el método VESTED® (Vitasek et al., 2013) en la formulación GMOP (Garcia-Sabater et al., 2013).

Bibliografía

- Acar, Y., & Atadeniz, S. N. (2015). Comparison of integrated and local planning approaches for the supply network of a globally-dispersed enterprise. *International Journal of Production Economics*, 167, 204–219. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.05.028>
- Agnetis, A., Aloulou, M. A., & Fu, L. L. (2016). Production and interplant batch delivery scheduling: Dominance and cooperation. *International Journal of Production Economics*, 182, 38–49. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.08.007>
- Agnetis, A., Hall, N. G., & Pacciarelli, D. (2006). Supply chain scheduling: Sequence coordination. *Discrete Applied Mathematics*, 154(15), 2044–2063. <https://doi.org/10.1016/j.dam.2005.04.019>
- Albrecht, M. (2010). *Supply Chain Coordination Mechanisms*. *Supply Chain Coordination Mechanisms* (Vol. 628). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-02833-5>
- Albrecht, M., & Stadtler, H. (2015). Coordinating decentralized linear programs by exchange of primal information. *European Journal of Operational Research*, 247(3), 788–796. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.06.045>
- Araujo, S. A., Arenales, M. N., & Clark, A. (2007). Joint rolling-horizon scheduling of materials processing and lot-sizing with sequence-dependent setups. *Journal of Heuristics*, 13(4), 337–358. <https://doi.org/10.1007/s10732-007-9011-9>
- Araujo, S. A., & Clark, A. (2013). A priori reformulations for joint rolling-horizon scheduling of materials processing and lot-sizing problem. *Computers & Industrial Engineering*, 65(4), 577–585. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2013.04.003>
- Araújo, J. A., Del-Olmo-Martínez, R., Laviós, J. J., & De-Benito-Martín, J. J. (2015). Programación y Control de Sistemas de Fabricación Flexibles: un Enfoque Holónico. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 12(1), 58–68. <https://doi.org/10.1016/j.riai.2014.11.005>
- Arkan, A., & Hejazi, S. R. (2012). Coordinating orders in a two echelon supply chain with controllable lead time and ordering cost using the credit period. *Computers and Industrial Engineering*, 62(1), 56–69. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2011.08.016>
- Arshinder, K., Kanda, A., & Deshmukh, S. G. (2008). Supply chain coordination: Perspectives, empirical studies and research directions. *International Journal of Production Economics*, 115(2), 316–335. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2008.05.011>
- Arshinder, K., Kanda, A., & Deshmukh, S. G. (2011). A Review on Supply Chain Coordination: Coordination Mechanisms, Managing Uncertainty and Research Directions. In T. M. Choi & T. C. E. Cheng (Eds.), *International Journal of Production Economics* (Vol. 115, pp. 315–335). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-19257-9>
- ASIC. (2018). Clúster de cálculo: Rigel. Retrieved July 22, 2018, from <http://www.upv.es/entidades/ASIC/catalogo/857893normalc.html>

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

- Attanasio, A., Ghiani, G., Grandinetti, L., & Guerriero, F. (2006). Auction algorithms for decentralized parallel machine scheduling. *Parallel Computing*, 32(9), 701–709. <https://doi.org/10.1016/j.parco.2006.03.002>
- Badole, C. M., Jain, R., Rathore, A. P. S., & Nepal, B. (2012). Research and Opportunities in Supply Chain Modeling: A Review. *International Journal of Supply Chain Management*, 1(3), 63–86.
- Bajgiran, O. S., Zanjani, M. K., & Nourelfath, M. (2016). The value of integrated tactical planning optimization in the lumber supply chain. *International Journal of Production Economics*, 171, 22–33. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.10.021>
- Baker, K. R. (1977). An experimental study of the effectiveness of rolling schedules in production planning. *Decision Sciences*, 8(1), 19–27. <https://doi.org/10.1111/j.1540-5915.1977.tb01065.x>
- Barratt, M. (2004). Understanding the meaning of collaboration in the supply chain. *Supply Chain Management: An International Journal*, 9(1), 30–42. <https://doi.org/10.1108/13598540410517566>
- Barrett, R. T., & LaForge, R. L. (1991). A study of replanning frequencies in a material requirements planning system. *Computers & Operations Research*, 18(6), 569–578. [https://doi.org/10.1016/0305-0548\(91\)90062-V](https://doi.org/10.1016/0305-0548(91)90062-V)
- Behnamian, J. (2014). Multi-cut Benders decomposition approach to collaborative scheduling. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 28(11), 1–11. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2014.961963>
- Behnamian, J., & Fatemi Ghomi, S. M. T. M. T. (2014). A survey of multi-factory scheduling. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 27(October 2012), 1–19. <https://doi.org/10.1007/s10845-014-0890-y>
- Ben-Daya, M., Darwish, M., & Ertogral, K. (2008). The joint economic lot sizing problem: Review and extensions. *European Journal of Operational Research*, 185(2), 726–742. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.12.026>
- Benders, J. F. (1962). Partitioning procedures for solving mixed-variables programming problems. *Numerische Mathematik*, 4(1), 238–252. <https://doi.org/10.1007/BF01386316>
- Bhatnagar, R., Chandra, P., & Goyal, S. K. (1993). Models for multi-plant coordination. *European Journal of Operational Research*, 67(2), 141–160. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(93\)90058-U](https://doi.org/10.1016/0377-2217(93)90058-U)
- Bitran, G. R., & Yanasse, H. H. (1982). Computational Complexity of the Capacitated Lot Size Problem. *Management Science*, 28(10), 1174–1186. <https://doi.org/10.1287/mnsc.28.10.1174>
- Bohlin, M., Gestrelus, S., Dahms, F., Mihalák, M., & Flier, H. (2016). Optimization Methods for Multistage Freight Train Formation. *Transportation Science*, 50(3), 823–840. <https://doi.org/10.1287/trsc.2014.0580>
- Boyd, S., Mutapcic, A., Xiao, L., & Mutapcic, A. (2008). Subgradient methods. *Lecture Notes of*

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

EE392o, Stanford ..., 1, 1–21.

- Buer, T., Homberger, J. J., & Gehring, H. (2013). A collaborative ant colony metaheuristic for distributed multi-level uncapacitated lot-sizing. *International Journal of Production Research*, 51(17), 5253–5270. <https://doi.org/10.1080/00207543.2013.802822>
- Buer, T., Ziebuhr, M., & Kopfer, H. (2015). *A Coordination Mechanism for a Collaborative Lot-Sizing Problem with Rivaling Agents*. (D. Mattfeld, T. Spengler, J. Brinkmann, & M. Grunewald, Eds.), *Logistics Management*. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-13177-1_26
- Buxmann, P., Ahsen, A. Von, & Díaz, L. M. (2008). Economic evaluation of cooperation scenarios in supply chains. *Journal of Enterprise Information Management*, 21(3), 247–262. <https://doi.org/10.1108/17410390810866628>
- Cachon, G. P. (2003). Supply Chain Management: Design, Coordination and Operation. *Handbooks in Operations Research and Management Science*, 11, 227–339. [https://doi.org/10.1016/S0927-0507\(03\)11006-7](https://doi.org/10.1016/S0927-0507(03)11006-7)
- Cao, Y. (2015). *Long-Distance Procurement Planning in Global Sourcing*. Ecole Centrale Paris. Retrieved from <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01154871/>
- Carlson, R. C., Beckman, S. L., & Kropp, D. H. (1982). The effectiveness of extending the horizon in rolling production scheduling. *Decision Sciences*, 13(1), 129–146. <https://doi.org/10.1111/j.1540-5915.1982.tb00136.x>
- Chakraborty, A., & Chatterjee, A. K. (2015). A surcharge pricing scheme for supply chain coordination under JIT environment. *European Journal of Operational Research*, 253(1), 14–24. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.02.001>
- Chand, S., Hsu, V. N., & Sethi, S. (2002). Forecast, solution, and rolling horizons in operations management problems: a classified bibliography. *Manufacturing & Service Operations Management*, 4(1), 25–43. <https://doi.org/10.1287/msom.4.1.25.287>
- Chen, I. J., Paulraj, A., & Lado, A. A. (2004). Strategic purchasing, supply management, and firm performance. *Journal of Operations Management*, 22(5), 505–523. <https://doi.org/10.1016/j.jom.2004.06.002>
- Cheng, Forbes, J. F., San Yip, W., Fraser Forbes, J., & Yip, W. S. (2008). Dantzig–Wolfe decomposition and plant-wide MPC coordination. *Computers and Chemical Engineering*, 32(7), 1507–1522. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2007.07.003>
- Cheng, J. H. (2011). Inter-organizational relationships and information sharing in supply chains. *International Journal of Information Management*, 31(4), 374–384. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2010.09.004>
- Collins. (2018). English Thesaurus. Retrieved February 1, 2016, from <https://www.collinsdictionary.com/dictionary/english-thesaurus>
- Conejo, A. J., Castillo, E., Minguez, R., & Garcia-Bertrand, R. (2006). *Decomposition Techniques in Mathematical Programming*. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/3-540-27686-6>

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

- Cooper, M. C., Lambert, D. M., & Pagh, J. D. (1997). Supply Chain Management: More Than a New Name for Logistics. *The International Journal of Logistics Management*, 8(1), 1–14. <https://doi.org/10.1108/09574099710805556>
- Coronado-Hernández, J. R. (2016). *Análisis del efecto de algunos factores de complejidad e incertidumbre en el rendimiento de las Cadenas de Suministro. Propuesta de una herramienta de valoración basada en simulación*. Universitat Politècnica de València, Valencia (Spain). <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/61467>
- Coronado-Hernández, J. R., Garcia-Sabater, J. P., Maheut, J., & Garcia-Sabater, J. (2010). Modelo de optimización estocástica para la planificación de cadenas de suministro para productos con ciclo de vida cortos. *WPOM-Working Papers on Operations Management*, 1(2), 1366–1375. <https://doi.org/10.4995/wpom.v1i2.785>
- Coronado-Hernández, J. R., Simancas-Mateus, D., Avila-Martinez, K., & Garcia-Sabater, J. P. (2017). Heuristic for Material and Operations Planning in Supply Chains with Alternative Product Structure. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 12(3), 628–635. <https://doi.org/10.3923/jeasci.2017.628.635>
- Crowston, K., Malone, T., & Crowston, K. (1994). The Interdisciplinary Study of Coordination. *Computing Surveys*, 26(1), 87–119. <https://doi.org/10.1145/174666.174668>
- CSCMP. (2017). Council of Supply Chain Management Professionals. Retrieved December 6, 2017, from http://cscmp.org/CSCMP/Educate/SCM_Definitions_and_Glossary_of_Terms/CSCMP/Educate/SCM_Definitions_and_Glossary_of_Terms.aspx?hkey=60879588-f65f-4ab5-8c4b-6878815ef921
- Dantzig, G. B., & Wolfe, P. (1960). Decomposition Principle for Linear Programs. *Operations Research*, 8(1), 101–111. <https://doi.org/10.1287/opre.8.1.101>
- Dash, R. K., Vytelingum, P., Rogers, A., David, E., & Jennings, N. R. (2007). Market-Based Task Allocation Mechanisms for Limited-Capacity Suppliers. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, 37(3), 391–405. <https://doi.org/10.1109/TSMCA.2007.893474>
- de Sampaio, R. J. B. B., Wollmann, R. R. G. G., Vieira, P. F. G. G., Sampaio, R. J. B. De, Wollmann, R. R. G. G., & Vieira, P. F. G. G. (2017). A flexible production planning for rolling-horizons. *International Journal of Production Economics*, 190(January 2016), 31–36. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.01.003>
- DeYong, G. D., & Cattani, K. D. (2016). Fenced in? Stochastic and deterministic planning models in a time-fenced, rolling-horizon scheduling system. *European Journal of Operational Research*, 251(1), 85–95. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.11.006>
- Dudek, G., & Stadtler, H. (2005). Negotiation-based collaborative planning between supply chains partners. *European Journal of Operational Research*, 163(3), 668–687. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.01.014>
- Dudek, G., & Stadtler, H. (2007). Negotiation-Based Collaborative Planning in Divergent Two-Tier Supply Chains. *International Journal of Production Research*, 45(2), 465–484.

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

- Ertogral, K., & David Wu, S. (2000). Auction-theoretic coordination of production planning in the supply chain. *IIE Transactions*, 32, 931–940. <https://doi.org/10.1080/07408170008967451>
- Eslkizi, S., Ziebuhr, M., Kopfer, H., & Buer, T. (2015). Shapley-based side payments and simulated annealing for distributed lot-sizing. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3), 1592–1597. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.313>
- Fan, M., Stallaert, J., & Whinston, A. B. (2003). Decentralized mechanism design for supply chain organizations using an auction ... *Information Systems Research*, 14(1), 1–22. <https://doi.org/10.1287/isre.14.1.1.14763>
- Federgruen, A., & Tzur, M. (1994). Minimal Forecast Horizons and a New Planning Procedure for the General Dynamic Lot Sizing Model: Nervousness Revisited. *Operations Research*, 42(3), 456–468. <https://doi.org/10.1287/opre.42.3.456>
- Feng, Y., D'Amours, S., & Beauregard, R. (2008). The value of sales and operations planning in oriented strand board industry with make-to-order manufacturing system: Cross functional integration under deterministic demand and spot market recourse. *International Journal of Production Economics*, 115(1), 189–209. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2008.06.002>
- Fisher, M. L. (1985). An Applications Oriented Guide to Lagrangian Relaxation. *Interfaces*, 15(2), 10–21. <https://doi.org/10.1287/inte.15.2.10>
- Fisher, M. L. (2004). The Lagrangian Relaxation Method for Solving Integer Programming Problems. *Management Science*, 50(12 Supplement), 1861–1871. <https://doi.org/10.1287/mnsc.1040.0263>
- Fisher, M. L., Ramdas, K., & Zheng, Y. S. (2001). Ending Inventory Valuation in Multiperiod Production Scheduling. *Management Science*, 47(5), 679–692. <https://doi.org/10.1287/mnsc.47.5.679.10485>
- Frayret, J. marc M., & Member, I. (2009). A multidisciplinary review of collaborative supply chain planning. *Conference Proceedings - IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, (October), 4414–4421. <https://doi.org/10.1109/ICSMC.2009.5346928>
- Frazzon, E., Makuschewits, T., Scholz-Reiter, B., & Novaes, A. G. N. (2010). Assessing the integrated scheduling of manufacturing and transportation systems along global supply chains. In *World conference on Transport Research*. Lisbon.
- Garcia-Sabater, J. P., Maheut, J., & Garcia-Sabater, J. J. (2009). A capacitated material requirements planning model considering delivery constraints: A case study from the automotive industry., 378–383. <https://doi.org/10.1109/ICCIE.2009.5223806>
- Garcia-Sabater, J. P., Maheut, J., & Marin-Garcia, J. A. (2013). A new formulation technique to model materials and operations planning: the generic materials and operations planning (GMOP) problem. *European J. of Industrial Engineering*, 7(2), 119. <https://doi.org/10.1504/EJIE.2013.052572>
- Gaudreault, J., Forget, P., Frayret, J. M. J., Rousseau, A., Lemieux, S., & D'Amours, S. (2010). Distributed operations planning in the softwood lumber supply chain: models and

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

- coordination. *International Journal of Industrial Engineering: Theory, Applications and Practice*, 17(3), 168–189.
- Guignard, M. (2003). Lagrangean relaxation. *Sociedad de Estadística e Investigación Operativa Top*, 11(2), 151–200. <https://doi.org/10.1007/BF02579036>
- Guignard, M., & Kim, S. (1987). Lagrangean decomposition: A model yielding stronger lagrangean bounds. *Mathematical Programming*, 39(2), 215–228. <https://doi.org/10.1007/BF02592954>
- Gunnerud, V., & Foss, B. (2010). Oil production optimization—A piecewise linear model, solved with two decomposition strategies. *Computers & Chemical Engineering*, 34(11), 1803–1812. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2009.10.019>
- Gupta, A., & Maranas, C. D. (1999). A Hierarchical Lagrangean Relaxation Procedure for Solving Midterm Planning Problems. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 38(5), 1937–1947. <https://doi.org/doi: 10.1021/ie980782t>
- Hair, J. F., Prentice, E., & Cano, D. (1999). *Análisis multivariante*. Prentice-Hall. Retrieved from https://books.google.es/books/about/Análisis_multivariante.html?hl=es&id=QV4INQAACAAJ&redir_esc=y
- Harb, H., Paprott, J. N., Matthes, P., Schütz, T., Streblow, R., & Mueller, D. (2015). Decentralized scheduling strategy of heating systems for balancing the residual load. *Building and Environment*, 86, 132–140. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.12.015>
- Held, M., & Karp, R. M. (1970). The Traveling-Salesman Problem and Minimum Spanning Trees. *Operations Research*, 18(6), 1138–1162. <https://doi.org/10.1287/opre.18.6.1138>
- Held, M., & Karp, R. M. (1971). The traveling-salesman problem and minimum spanning trees: Part II. *Mathematical Programming*, 1(1), 6–25. <https://doi.org/10.1007/BF01584070>
- Held, M., Wolfe, P., & Crowder, H. P. (1974). Validation of subgradient optimization. *Mathematical Programming*, 6(1), 62–88. <https://doi.org/10.1007/BF01580223>
- Hellingrath, B., & Küppers, P. (2011). Multi-agent based collaborative demand and capacity network planning in heterarchical supply chains. *ARTIFICIAL INTELLIGENCE*. Retrieved from <http://www.sfbtr8.spatial-cognition.de/ailog-2011/ailog-downloads/2011/AIlog-2011-Proceedings.pdf#page=31>
- Homberger, J. (2010). Decentralized multi-level uncapacitated lot-sizing by automated negotiation. *4OR*, 8(2), 155–180. <https://doi.org/10.1007/s10288-009-0104-1>
- Homberger, J. (2011). A generic coordination mechanism for lot-sizing in supply chains. *Electronic Commerce Research*, 11(2), 123–149. <https://doi.org/10.1007/s10660-010-9053-1>
- Homberger, J., & Gehring, H. (2011). An ant colony optimization-based negotiation approach for lot-sizing in supply chains. *International Journal of Information Processing and Management*, 2(3), 86–99. <https://doi.org/10.4156/ijipm.vol2.issue3.10>
- Homberger, J., Gehring, H., & Buer, T. (2015). Integrating Side Payments into Collaborative

- Planning for the Distributed Multi-level Unconstrained Lot Sizing Problem. In T. X. Bui & R. H. Sprague (Eds.), *2015 48th Hawaii International Conference on System Sciences* (Vol. 2015-March, pp. 1068–1077). IEEE. <https://doi.org/10.1109/HICSS.2015.131>
- Homberger, J., Gehring, H., & Ieee. (2010). A pheromone-based negotiation mechanism for lot-sizing in supply chains. In *2010 43rd Hawaii International Conference on System Sciences* (pp. 1–10). IEEE. <https://doi.org/10.1109/HICSS.2010.26>
- Hozak, K., & Hill, J. A. (2009). Issues and opportunities regarding replanning and rescheduling frequencies. *International Journal of Production Research*, *47*(18), 4955–4970. <https://doi.org/10.1080/00207540802047106>
- Hsu, C. H. C. H., & Yang, H. C. H. C. (2017). Real-Time Near-Optimal Scheduling with Rolling Horizon for Automatic Manufacturing Cell. *IEEE Access*, *5*, 3369–3375. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2616366>
- Huang, G. Q., Lau, J. S. K., & Mak, K. L. (2003). The impacts of sharing production information on supply chain dynamics: A review of the literature. *International Journal of Production Research*, *41*(7), 1483–1517. <https://doi.org/10.1080/0020754031000069625>
- Jeet, V., & Kutanoglu, E. (2007). Lagrangian relaxation guided problem space search heuristics for generalized assignment problems. *European Journal of Operational Research*, *182*(3), 1039–1056. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.09.060>
- Jeong, I. J. (2012). A centralized/decentralized design of a full return contract for a risk-free manufacturer and a risk-neutral retailer under partial information sharing. *International Journal of Production Economics*, *136*(1), 110–115. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2011.09.019>
- Jeong, & Leon, V. J. (2002). Decision-making and cooperative interaction via coupling agents in organizationally distributed systems. *IIE Transactions (Institute of Industrial Engineers)*, *34*(9), 789–802. <https://doi.org/10.1023/A:1015548705266>
- Jeong, & Yim, S. B. (2009). A job shop distributed scheduling based on Lagrangian relaxation to minimise total completion time. *International Journal of Production Research*, *47*(24), 6783–6805. <https://doi.org/10.1080/00207540701824217>
- Jia, Z. Z., Deschamps, J. C., & Dupas, R. (2016). A negotiation protocol to improve planning coordination in transport-driven supply chains. *Journal of Manufacturing Systems*, *38*, 13–26. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2015.10.003>
- Jung, H., Chen, F. F., & Jeong, B. (2008). Decentralized supply chain planning framework for third party logistics partnership. *Computers & Industrial Engineering*, *55*(2), 348–364. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2007.12.017>
- Karimi, B., Fatemi Ghomi, S. M. T., & Wilson, J. M. (2003). The capacitated lot sizing problem: A review of models and algorithms. *Omega*, *31*(5), 365–378. [https://doi.org/10.1016/S0305-0483\(03\)00059-8](https://doi.org/10.1016/S0305-0483(03)00059-8)
- Katok, E., & Pavlov, V. (2013). Fairness in supply chain contracts: A laboratory study. *Journal of Operations Management*, *31*(3), 129–137. <https://doi.org/10.1016/j.jom.2013.01.001>

- Kelly, J. D., & Zyngier, D. (2008). Hierarchical decomposition heuristic for scheduling: Coordinated reasoning for decentralized and distributed decision-making problems. *Computers & Chemical Engineering*, 32(11), 2684–2705. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2007.08.007>
- Kong, J., & Rönnqvist, M. (2014). Coordination between strategic forest management and tactical logistic and production planning in the forestry supply chain. *International Transactions in Operational Research*, 21(5), 703–735. <https://doi.org/10.1111/itor.12089>
- Kovács, A., Egri, P., Kis, T., & Vánca, J. (2013). Inventory control in supply chains: Alternative approaches to a two-stage lot-sizing problem. *International Journal of Production Economics*, 143(2), 385–394. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.01.001>
- Kumar, B. K., Nagaraju, D., & Narayanan, S. (2016). Supply Chain Coordination Models: A Literature Review. *Indian Journal of Science and Technology*, 9(38). <https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i38/86938>
- Kutanoglu, E., & David Wu, S. (1999). On combinatorial auction and Lagrangean relaxation for distributed resource scheduling. *IIE Transactions*, 31(9), 813–826. <https://doi.org/10.1080/07408179908969883>
- Lalami, I., Frein, Y., & Gayon, J. P. (2017). Production planning in automotive powertrain plants: a case study. *International Journal of Production Research*, 55(18), 5378–5393. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1315192>
- Lang, F., & Fink, A. (2014). Decision support for negotiation protocol selection: A machine learning approach based on artificial neural networks. In *ECIS 2014 Proceedings - 22nd European Conference on Information Systems*. Retrieved from <http://aisel.aisnet.org/ecis2014/proceedings/track08/8/>
- Lau, H. C., Zhao, Z. J., Ge, S. S., & Lee, T. H. (2011). Allocating resources in multiagent flowshops with adaptive auctions. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 8(4), 732–743. <https://doi.org/10.1109/TASE.2011.2160536>
- Lee, H. L., Padmanabhan, V., & Whang, S. (1997). The Bullwhip Effect In Supply Chains 1. *Sloan Management Review Association*, 38(3), 93–102. <https://doi.org/10.1287/mnsc.43.4.546>
- Lee, & Jeong, I. J. (2010). A distributed coordination for a single warehouse-multiple retailer problem under private information. *International Journal of Production Economics*, 125(1), 190–199. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2010.02.001>
- Lee, Villasenor, J. D., Luk, W., & Leong, P. H. W. (2006). A hardware Gaussian noise generator using the box-muller method and its error analysis. *IEEE Transactions on Computers*, 55(6), 659–671. <https://doi.org/10.1109/TC.2006.81>
- Lehoux, N., D'Amours, S., Frein, Y., Langevin, A., & Penz, B. (2010a). Collaboration for a two-echelon supply chain in the pulp and paper industry: the use of incentives to increase profit. *Journal of the Operational Research Society*, 62(4), 581–592. <https://doi.org/10.1057/jors.2009.167>
- Lehoux, N., D'Amours, S., & Langevin, A. (2010b). A win-win collaboration approach for a two-

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

- echelon supply chain: a case study in the pulp and paper industry. *European J. of Industrial Engineering*, 4(4), 493. <https://doi.org/10.1504/EJIE.2010.035656>
- Lehoux, N., D'Amours, S., & Langevin, A. (2014). Inter-firm collaborations and supply chain coordination: review of key elements and case study. *Production Planning & Control*, 25(10), 858–872. <https://doi.org/10.1080/09537287.2013.771413>
- Lemaréchal, C. (2001). Lagrangian Relaxation. *Computational Combinatorial Optimization*, 112–156. https://doi.org/10.1007/3-540-45586-8_4
- Li, & Wang. (2007). Coordination mechanisms of supply chain systems. *European Journal of Operational Research*, 179(1), 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.06.023>
- Lidestam, H., & Rönnqvist, M. (2011). Use of Lagrangian decomposition in supply chain planning. *Mathematical and Computer Modelling*, 54(9–10), 2428–2442. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2011.05.054>
- Lu, S. Y. P., Lau, H. Y. K., & Yiu, C. K. F. (2012). A hybrid solution to collaborative decision-making in a decentralized supply-chain. *Journal of Engineering and Technology Management*, 29(1), 95–111. <https://doi.org/10.1016/j.jengtecman.2011.09.008>
- Lv, Y., Zhang, J., & Qin, W. (2017). A Genetic Regulatory Network-Based Method for Dynamic Hybrid Flow Shop Scheduling with Uncertain Processing Times. *Applied Sciences*, 7(1), 23. <https://doi.org/10.3390/app7010023>
- Mahdiraji, H. A., Zavadskas, E. K., & Hajiagha, S. H. R. (2015). Game theoretic approach for coordinating unlimited multi echelon supply chains. *Transformations in Business and Economics*, 14(2), 133–151.
- Maheut, J. (2013). *Modelos y Algoritmos Basados en el Concepto Stroke para la Planificación y Programación de Operaciones con Alternativas en Redes de Suministro*. Universitat Politècnica de València, Valencia (Spain). <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/29290>
- Maheut, J., Besga, J. M., Uribetxebarria, J., & Garcia-Sabater, J. P. (2014a). A decision support system for modelling and implementing the supply network configuration and operations scheduling problem in the machine tool industry. *Production Planning & Control*, 25(8), 679–697. <https://doi.org/10.1080/09537287.2013.798087>
- Maheut, J., & Garcia-Sabater, J. P. (2011). La matriz de operaciones y materiales y la matriz de operaciones y recursos, un nuevo enfoque para resolver el problema GMOP basado en el concepto del stroke. *Dirección y Organización*, 45, 46–57.
- Maheut, J., Garcia-Sabater, J. P., Garcia-Sabater, J. J., & Marin-Garcia, J. (2014b). Coordination Mechanism for MILP Models to Plan Operations Within an Advanced Planning and Scheduling System in a Motor Company: A Case Study. In *Annals of Industrial Engineering 2012* (pp. 245–253). London: Springer London. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-5349-8_29
- Maheut, J., Garcia-Sabater, J. P., & Mula, J. (2012). The Generic Materials and Operations Planning (GMOP) problem solved iteratively: A case study in multi-site context. *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, 384 AICT, 66–73.

https://doi.org/10.1007/978-3-642-33980-6_8

- Manrodt, K. B., & Vitasek, K. (2004). Global Process Standardization: a Case Study. *Journal of Business Logistics*, 25(1), 1–23. <https://doi.org/10.1002/j.2158-1592.2004.tb00168.x>
- Marin-Garcia, J. A., Ramirez Bayarri, L., & Atares Huerta, L. (2015). Protocol: Comparing advantages and disadvantages of Rating Scales, Behavior Observation Scales and Paired Comparison Scales for behavior assessment of competencies in workers. A systematic literature review. *Working Papers on Operations Management*, 6(2), 49. <https://doi.org/10.4995/wpom.v6i2.4032>
- Mason, A. N., & Villalobos, J. R. (2015). Coordination of perishable crop production using auction mechanisms. *Agricultural Systems*, 138, 18–30. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2015.04.008>
- McAfee, R. P., & McMillan, J. (1987). Auctions and Bidding. *Journal of Economic Literature*, 25(2), 699–738.
- Mcdonald, C. M., & Karimi, I. A. (1997). Planning and Scheduling of Parallel Semicontinuous Processes . 1 . Production Planning. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 36(7), 2691–2700. <https://doi.org/10.1021/ie960901+>
- Medina-Lopez, C., Marin-Garcia, J. A., & Alfalla-Luque, R. (2010). Una propuesta metodológica para la realización de búsquedas sistemáticas de bibliografía (A methodological proposal for the systematic literature review). *Working Papers on Operations Management*, 1(2). <https://doi.org/10.4995/wpom.v1i2.786>
- Meindl, B., & Templ, M. (2012). Analysis of commercial and free and open source solvers for linear optimization problems. *Common Tools and Harmonized Methodologies for SDC in the ESS*, 1–13. Retrieved from http://neon.vb.cbs.nl/cascprivate/..%5Ccasc%5CESSNet%5Cdeliverable_solverstudy.pdf
- Mejias-Sacaluga, A., Prado-Prado, J. C., Mejías-Sacaluga, A., & Prado-Prado, J. C. (2003). Implementing buyer-supplier partnerships in retailing channels through continuous improvement. *International Journal of Services, Technology and Management*, 4(2), 181–193. <https://doi.org/10.1504/IJSTM.2003.002578>
- Mouret, S., Grossmann, I. E., & Pestiaux, P. (2011). A new Lagrangian decomposition approach applied to the integration of refinery planning and crude-oil scheduling. *Computers & Chemical Engineering*, 35(12), 2750–2766. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2011.03.026>
- Mula, J., Peidro, D., Díaz-Madroñero, M., & Vicens, E. (2010). Mathematical programming models for supply chain production and transport planning. *European Journal of Operational Research*, 204(3), 377–390. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.09.008>
- Narayanan, A., & Robinson, P. (2010). Evaluation of joint replenishment lot-sizing procedures in rolling horizon planning systems. *International Journal of Production Economics*, 127(1), 85–94. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2010.04.038>
- Nedaei, H., & Mahlooji, H. (2014). Joint multi-objective master production scheduling and rolling

- horizon policy analysis in make-to-order supply chains. *International Journal of Production Research*, 52(9), 2767–2787. <https://doi.org/10.1080/00207543.2014.884732>
- Nelder, J. A., & Mead, R. (1965). A Simplex Method for Function Minimization. *The Computer Journal*, 7(4), 308–313. <https://doi.org/10.1093/comjnl/7.4.308>
- Newman, M. E. J. (2004). Power laws, Pareto distributions and Zipf's law, (1). <https://doi.org/10.1016/j.cities.2012.03.001>
- Nie, L., Xu, X., & Zhan, D. (2008). Collaborative planning in supply chains by lagrangian relaxation and genetic algorithms. *International Journal of Information Technology & Decision Making*, 7(1), 183–197. <https://doi.org/10.1142/s0219622008002879>
- Nishi, T., Shinozaki, R., & Konishi, M. (2008). An Augmented Lagrangian Approach for Distributed Supply Chain Planning for Multiple Companies. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 5(2), 259–274. <https://doi.org/10.1109/TASE.2007.894727>
- Ogier, M., Chan, F. T. S., Chung, S. H., Cung, V. D., & Boissière, J. (2015). Decentralised capacitated planning with minimal-information sharing in a 2-echelon supply chain. *International Journal of Production Research*, 53(16), 4927–4950. <https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1005763>
- Omar, M. K., & Bennell, J. A. (2009). Revising the master production schedule in a HPP framework context. *International Journal of Production Research*, 47(20), 5857–5878. <https://doi.org/10.1080/00207540802130803>
- Ouelhadj, D., & Petrovic, S. (2009). A survey of dynamic scheduling in manufacturing systems. *Journal of Scheduling*, 12(4), 417–431. <https://doi.org/10.1007/s10951-008-0090-8>
- Pajek. (2017). Analysis and visualization of large networks. Retrieved August 1, 2017, from <http://mrvar.fdv.uni-lj.si/pajek/>
- Pérez-López, C. (1998). *Métodos Estadísticos con Statgraphics para Windows. Técnicas Básicas.* (R. M. Editorial, Ed.). Madrid. Retrieved from www.ra-ma.es
- Pérez, C. (2002). *Estadística práctica con Statgraphics®.* Madrid: PEARSON EDUCACIÓN, S. A.
- Peset-Mancebo, F., Ferrer-Sapena, A., Villamón-Herrera, M., Millán-González, L., Toca-Herrera, J. L., & Aleixandre-Benavent, R. (2013). Scientific literature analysis of Judo in Web of Science. *Archives of Budo.*, 9(2), 81–91. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.12659/aob.883883>
- Pibernik, R., & Sucky, E. (2007). An approach to inter-domain master planning in supply chains. *International Journal of Production Economics*, 108(1–2), 200–212. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2006.12.010>
- Pittman, S. D., Bare, B. B., & Briggs, D. G. (2007). Hierarchical production planning in forestry using price-directed decomposition. *Canadian Journal of Forest*, 37(10), 2010–2021. <https://doi.org/10.1139/X07-026>
- Pochet, Y., & Wolsey, L. A. (2006). *Production Planning by Mixed Integer Programming.* (T. V. M. S. I. R. S. M. Robinson, Ed.), *Springer Series in Operations Research and Financial*

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

Engineering (Vol. 1). Springer New York. <https://doi.org/10.1007/0-387-33477-7>

Polyak, B. T. (1969). Minimization of unsmooth functionals. *USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 9(3), 14–29. [https://doi.org/10.1016/0041-5553\(69\)90061-5](https://doi.org/10.1016/0041-5553(69)90061-5)

Prasad, P. S. S., Krishnaiah Chetty, O. V., & Prasad, P. S. S. (2001). Multilevel Lot Sizing with a Genetic Algorithm Under Fixed and Rolling Horizons. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 18(7), 520–527. <https://doi.org/10.1007/s001700170045>

Prisma. (2015). Retrieved January 1, 2017, from [http://www.prisma-statement.org/documents/PRISMA 2009 flow diagram.doc](http://www.prisma-statement.org/documents/PRISMA%202009%20flow%20diagram.doc)

Pukkala, T., Heinonen, T., & Kurttila, M. (2009). An application of a reduced cost approach to spatial forest planning. *Forest Science*, 55(1), 13–22.

Qu, T., Nie, D. X., Chen, X., Chen, X. D., Dai, Q. Y., & Huang, G. Q. (2015). Optimal configuration of cluster supply chains with augmented Lagrange coordination. *Computers and Industrial Engineering*, 84(SI), 43–55. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2014.12.026>

Rafiei, R., Gaudreault, J., Bouchard, M., & Santa-Eulalia, L. (2012). *A Reactive Planning Approach for Demand-driven Wood Remanufacturing Industry: A Real-scale Application*. CIRRELT (Vol. 71).

Ramanathan, U., & Gunasekaran, A. (2014). Supply chain collaboration: Impact of success in long-term partnerships. *International Journal of Production Economics*, 147(PART B), 252–259. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.06.002>

Ramezani, R., Fallah Sanami, S., & Shafiei Nikabadi, M. (2017). A simultaneous planning of production and scheduling operations in flexible flow shops: case study of tile industry. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 88(9–12), 2389–2403. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8955-z>

Reiss, F., & Buer, T. (2014). A coordination mechanism for capacitated lot-sizing in non-hierarchical n-tier supply chains. *2014 IEEE Symposium on Computational Intelligence in Production and Logistics Systems (Cipls)*, 9–15. <https://doi.org/10.1109/CIPLS.2014.7007155>

Rius-Sorolla, G., Maheut, J., Coronado-Hernandez, J. R., & Garcia-Sabater, J. P. (2018a). Lagrangian relaxation of the generic materials and operations planning model. *Central European Journal of Operations Research*. <https://doi.org/10.1007/s10100-018-0593-0>

Rius-Sorolla, G., Maheut, J., Estelles-Miguel, S., & Garcia-Sabater, J. P. (2017). Protocol: Systematic Literature Review on coordination mechanisms for the mathematical programming models in production planning with decentralized decision making. *WPOM-Working Papers on Operations Management*, 8(2), 22. <https://doi.org/10.4995/wpom.v8i2.7858>

Rius-Sorolla, G., Maheut, J., Estellés-Miguel, S., & Garcia-Sabater, J. P. (2018b). Coordination mechanisms with mathematical programming models for decentralized decision-making: a literature review. *Central European Journal of Operations Research*. <https://doi.org/10.1007/s10100-018-0594-z>

- Rius-Sorolla, G., Maheut, J., & Garcia-Sabater, J. P. (2018c). Distributed programming production planning with a shared capacity coordinated by a Lagrangian relaxation model on a rolling horizon. In *CONFERENCE HANDBOOK #euro2018valencia* (p. 246). Valencia (Spain).
- Rodriguez, M. A., Montagna, J. M., Vecchiotti, A., & Corsano, G. (2017). Generalized disjunctive programming model for the multi-period production planning optimization: An application in a polyurethane foam manufacturing plant. *Computers & Chemical Engineering*, *103*, 69–80. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2017.03.006>
- Sahin, F., Narayanan, A., & Robinson, E. P. (2013). Rolling horizon planning in supply chains: review, implications and directions for future research. *International Journal of Production Research*, *51*(18), 5413–5436. <https://doi.org/10.1080/00207543.2013.775523>
- Sahin, F., & Robinson, E. P. P. (2002). Flow Coordination and Information Sharing in Supply Chains : Review , Implications , and Directions for Future Research. *Decision Sciences*, *33*(4), 505–535. <https://doi.org/10.1111/j.1540-5915.2002.tb01654.x>
- Scopus. (2017). Scopus: Access and use Support Center. Retrieved September 10, 2017, from https://service.elsevier.com/app/answers/detail/a_id/11236/supporthub/scopus/RN.Incident.CustomFields.portal_account_id/53929/#tips
- Sethi, S., & Sorger, G. (1991). A theory of rolling horizon decision making. *Annals of Operations Research*, *29*(1), 387–415. <https://doi.org/10.1007/BF02283607>
- Sherali, H. D., & Choi, G. (1996). Recovery of primal solutions when using subgradient optimization methods to solve Lagrangian duals of linear programs. *Operations Research Letters*, *19*(3), 105–113. [https://doi.org/10.1016/0167-6377\(96\)00019-3](https://doi.org/10.1016/0167-6377(96)00019-3)
- Silva, C. A., Sousa, J. M. C., Runkler, T. A., & Sá da Costa, J. . (2009). Distributed supply chain management using ant colony optimization. *European Journal of Operational Research*, *199*(2), 349–358. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.11.021>
- Simatupang, T., & Sridharan, R. (2006). The collaboration index: a measure for supply chain collaboration. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, *35*, 44–62. <https://doi.org/10.1108/09600030510577421>
- Simpson, N. C. (2001). Questioning the relative virtues of dynamic lot sizing rules. *Computers & Operations Research*, *28*(9), 899–914. [https://doi.org/10.1016/S0305-0548\(00\)00015-0](https://doi.org/10.1016/S0305-0548(00)00015-0)
- Singh, G., & Ernst, A. (2011). Resource constraint scheduling with a fractional shared resource. *Operations Research Letters*, *39*(5), 363–368. <https://doi.org/10.1016/j.orl.2011.06.003>
- Singh, G., & O’Keefe, C. M. (2016). Decentralised scheduling with confidentiality protection. *Operations Research Letters*, *44*(4), 514–519. <https://doi.org/10.1016/j.orl.2016.05.004>
- Sokoler, L. E., Standardi, L., Edlund, K., Poulsen, N. K., Madsen, H., & Jørgensen, J. B. (2014). A Dantzig-Wolfe decomposition algorithm for linear economic model predictive control of dynamically decoupled subsystems. *Journal of Process Control*, *24*(8), 1225–1236. <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2014.05.013>
- Sridharan, R., & Simatupang, T. M. (2009). Managerial Views of Supply Chain Collaboration. *Gadjah Mada International Journal of Business*, *11*(2), 253–273.

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

- Stadtler, H. (2000). Improved Rolling Schedules for the Dynamic Single-Level Lot-Sizing Problem. *Management Science*, 46(2), 318–326. <https://doi.org/10.1287/mnsc.46.2.318.11924>
- Stadtler, H. (2003). Multilevel Lot Sizing with Setup Times and Multiple Constrained Resources: Internally Rolling Schedules with Lot-Sizing Windows. *Operations Research*, 51(3), 487–502. <https://doi.org/10.1287/opre.51.3.487.14949>
- Stadtler, H. (2007). A framework for collaborative planning and state-of-the-art. *OR Spectrum*, 31(1), 5–30. <https://doi.org/10.1007/s00291-007-0104-5>
- Stadtler, H., & Kilger, C. (2008). *Supply Chain Management and Advanced Planning*. (H. Stadtler & C. Kilger, Eds.), *Supply Chain Management and Advanced Planning. Concepts, Models, Software, and Case Studies*. Springer.
- Stank, T. P., Goldsby, T. J., & Vickery, S. K. (1999). Effect of service supplier performance on satisfaction and loyalty of store managers in the fast food industry. *Journal of Operations Management*, 17(4), 429–447. [https://doi.org/10.1016/S0272-6963\(98\)00052-7](https://doi.org/10.1016/S0272-6963(98)00052-7)
- Taghipour, A., & Frayret, J. M. (2013). An algorithm to improve operations planning in decentralized supply chains. In *2013 International Conference on Advanced Logistics and Transport, ICALT 2013* (pp. 100–103). <https://doi.org/10.1109/ICAdLT.2013.6568442>
- Tang, S. H., Rahimi, I., & Karimi, H. (2016a). Objectives, products and demand requirements in integrated supply chain network design: a review. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 23(2), 181. <https://doi.org/10.1504/IJISE.2016.076399>
- Tang, Zeng, C., & Pan, Z. (2016b). Auction-based cooperation mechanism to parts scheduling for flexible job shop with inter-cells. *Applied Soft Computing*, 49, 590–602. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2016.08.046>
- Thomas, A., Krishnamoorthy, M., Singh, G., & Venkateswaran, J. (2015). Coordination in a multiple producers-distributor supply chain and the value of information. *International Journal of Production Economics*, 167, 63–73. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.05.020>
- Thomas, A., Singh, G., Krishnamoorthy, M., & Venkateswaran, J. (2013). Distributed optimisation method for multi-resource constrained scheduling in coal supply chains. *International Journal of Production Research*, 51(9), 2740–2759. <https://doi.org/10.1080/00207543.2012.737955>
- Thomas, A., Venkateswaran, J., Singh, G., & Krishnamoorthy, M. (2014). A resource constrained scheduling problem with multiple independent producers and a single linking constraint: A coal supply chain example. *European Journal of Operational Research*, 236(3), 946–956. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.10.006>
- Tiacci, L., & Saetta, S. (2012). Demand forecasting, lot sizing and scheduling on a rolling horizon basis. In *International Journal of Production Economics* (Vol. 140, pp. 803–814). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.02.007>
- Tolio, T., Urgo, M., & Váncza, J. (2011). Robust production control against propagation of disruptions. *CIRP Annals*, 60(1), 489–492. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2011.03.047>
- Vazsonyi, A. (1954). The Use of Mathematics in Production and Inventory Control. *Management*

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

Science, 1(1), 70–85. <https://doi.org/10.1287/mnsc.1.1.70>

Vickrey, W. (1961). Counterspeculation, Auctions, and Competitive Sealed Tenders. *The Journal of Finance*, 16(1), 8–37. <https://doi.org/10.1111/j.1540-6261.1961.tb02789.x>

VICS. (2004). Collaborative Planning, Forecasting and Replenishment. Retrieved January 21, 2017, from <https://www.gs1us.org/>

Vidal-Carreras, P. I., Garcia-Sabater, J. P., & Coronado-Hernandez, J. R. (2012). Economic lot scheduling with deliberated and controlled coproduction. *European Journal of Operational Research*, 219(2), 396–404. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.12.020>

Vitasek, K. (2016). Strategic sourcing business models. *Strategic Outsourcing: An International Journal*, 9(2), 126–138. <https://doi.org/10.1108/SO-02-2016-0003>

Vitasek, K., Ledyard, M., & Manrodt, K. (2013). Getting to We: A New Negotiating Model. In *Vested Outsourcing: Five Rules That Will Transform Outsourcing* (pp. 177–184). New York: Palgrave Macmillan US. https://doi.org/10.1057/9781137321183_12

Walpole, R. E., Raymond, M. H., & Sharon, M. L. (1999). *Probabilidad y Estadística para ingenieros*. (P. H. H. S.A., Ed.) (6th ed.). México.

Walsh, W. E. (2001). *Market Protocols for Decentralized Supply Chain Formation. Analysis*. Michigan.

Walther, G., Schmid, E., & Spengler, T. S. (2008). Negotiation-based coordination in product recovery networks. *International Journal of Production Economics*, 111(2), 334–350. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2006.12.069>

Waltman, L., van Eck, N. J., & Noyons, E. C. M. (2010). A unified approach to mapping and clustering of bibliometric networks. *Journal of Informetrics*, 4(4), 629–635. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2010.07.002>

Wang, L., Pfohl, H. C., Berbner, U., & Keck, A. K. (2016). Supply Chain Collaboration or Conflict? Information Sharing and Supply Chain Performance in the Automotive Industry. In U. Clausen, H. Friedrich, C. Thaller, & C. Geiger (Eds.), *Commercial Transport* (pp. 303–318). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-21266-1_20

Wellman, M. P., Walsh, W. E., Wurman, P. R., & Mackie-mason, J. K. (2001). Auction Protocols for Decentralized Scheduling. *Games and Economic Behavior*, 35(1–2), 271–303. <https://doi.org/10.1006/game.2000.0822>

Wenzel, S., Paulen, R., Krämer, S., Beisheim, B., & Engell, S. (2016a). Shared resource allocation in an integrated petrochemical site by price-based coordination using quadratic approximation. In *2016 European Control Conference, ECC 2016* (pp. 1045–1050). <https://doi.org/10.1109/ECC.2016.7810427>

Wenzel, S., Paulen, R., Stojanovski, G., Kraemer, S., Beisheim, B., & Engell, S. (2016b). Optimal resource allocation in industrial complexes by distributed optimization and dynamic pricing. *At - Automatisierungstechnik*, 64(6), 428–442. <https://doi.org/10.1515/auto-2016-0003>

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

- Whang, S. (1995). Coordination in operations: A taxonomy. *Journal of Operations Management*, 12(3–4), 413–422. [https://doi.org/10.1016/0272-6963\(95\)00010-P](https://doi.org/10.1016/0272-6963(95)00010-P)
- WoS. (2017). Web of Science All Databases Help. Retrieved September 10, 2017, from https://images.webofknowledge.com/WOKRS5251R3/help/WOK/hs_advanced_fieldtags.html
- Xie, J., Zhao, X., & Lee, T. S. (2003). Freezing the master production schedule under single resource constraint and demand uncertainty. *International Journal of Production Economics*, 83(1), 65–84. [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(02\)00262-1](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(02)00262-1)
- Yıldırım, I., Tan, B., & Karaesmen, F. (2005). A multiperiod stochastic production planning and sourcing problem with service level constraints. *OR Spectrum*, 27(2–3), 471–489. <https://doi.org/10.1007/s00291-005-0203-0>
- Zamarripa, M., Marchetti, P. A., Grossmann, I. E., Singh, T., Lotero, I., Gopalakrishnan, A., ... André, J. (2016). Rolling Horizon Approach for Production–Distribution Coordination of Industrial Gases Supply Chains. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 55(9), 2646–2660. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.6b00271>
- Zhang, Z. H., Jiang, H., & Pan, X. (2012). A Lagrangian relaxation based approach for the capacitated lot sizing problem in closed-loop supply chain. *International Journal of Production Economics*, 140(1), 249–255. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.01.018>
- Zhou, H., & W C Benton, J. (2007). Supply chain practice and information sharing. *Journal of Operations Management*, 25(6), 1348–1365. <https://doi.org/10.1016/j.jom.2007.01.009>
- Ziebuhr, M., Buer, T., & Kopfer, H. (2013). Agent-negotiation of lot-sizing contracts by simulated annealing with part-way resets. In *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)* (Vol. 8076 LNAI). <https://doi.org/10.1007/978-3-642-40776-5-16>
- Ziebuhr, M., Buer, T., & Kopfer, H. (2015). A Collaborative Lot-Sizing Problem with Production Limitations. In Patrick Kellenberger (Ed.), *2015 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence* (pp. 1005–1012). Cape Town, South Africa: IEEE. <https://doi.org/10.1109/SSCI.2015.146>
- Zoghalmi, N., Taghipour, A., Merlo, C., & Abed, M. (2016). Management of divergent production network using decentralised multi-level capacitated lot-sizing models. *International Journal of Shipping and Transport Logistics*, 8(5), 590–604. <https://doi.org/10.1504/ijstl.2016.10000270>
- Zulkafli, N. I., & Kopanos, G. M. (2017). Integrated condition-based planning of production and utility systems under uncertainty. *Journal of Cleaner Production*, 167, 776–805. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.152>

ANEXOS

ANEXO 1: Instancias utilizadas en el capítulo cuarto

Primera instancia.

D _{i,t}	H _{i,t}	CO _{k,t}	CS _{k,t}	Cb _{i,t}	SO _{i,k}	Sl _{i,k}	LT _k	KAP _{r,t}	TO _{k,r}	TS _{k,r}
145	11	8	10	20	50	6	1	469	5	9
972	13	5	10	14	44	6	2	466	4	5
773	15	6	10	17	48	8	1	475	4	6
228	18	8	8	15	50	8	1	446	2	6
962	15	5	6	19	48	4	2	433	2	8
631	13	7	7	19	36	7	1	447	4	6
872	18	5	5	12	41	5	1	486	4	9
150	12	6	8	18	46	8	2	416	3	7
753	12	8	7	10	49	4	1	415	4	8
747	18	6	8	19	50	7	2	446	5	9
525	14	8	9	18	37	8		453	2	9
288	18	7	9	10	44	5		459	5	10
760	15	5	8	13	42	5		442	3	6
246	16	7	5	17	35	4		491	4	8
520	11	5	8	10	36	7		401	4	8
768	16	8	6	18	43	6		487	4	7
447	18	5	9	10	45	7		456	3	9
749	17	5	9	15	35	6		421	5	5
504	10	8	7	14	37	7		426	2	5
575	20	5	10	20	50	5		466	2	8
123	12	6	8	10	44	5		420	5	9
818	17	7	7	17	43	5		429	2	6
774	12	8	9	10	43	8		456	2	7
668	10	8	10	11	43	6		482	3	9
986	20	5	8	13	44	5		422	3	10
934	12	7	8	10	40	6		448	4	9
427	15	6	7	17	42	6		423	3	7
806	18	8	5	19	44	7		498	5	6
331	12	5	9	19	49	6		450	2	6
433	20	7	5	19	41	7		493	5	6
366	11	8	7	20	41	5		491	4	7
400	16	5	8	14	46	8		444	3	5
455	15	6	6	15	43	7		408	3	6
711	10	5	8	15	44	6		442	5	7
182	11	7	7	11	41	5		415	3	8
207	18	7	7	14	49	7		423	3	6
371	11	7	10	13	42	6		473	4	5
542	12	7	9	17	35	5		423	4	7
451	14	7	8	18	35	7		445	3	6
962	12	6	8	18	45	8		433	4	6
332	18	7	10	16	42	6		469	2	6
657	20	7	9	11	48	6		463	2	7
105	20	5	6	14	45	5		406	4	5
438	20	7	9	12	42	8		449	4	8
340	10	7	5	20	46	6		496	5	8
157	15	8	6	16	50	8		481	4	6
705	16	7	6	17	44	4		473	5	5
862	18	7	7	10	44	6		496	3	7
871	13	7	7	16	40	4		428	5	6
842	16	5	9	17	40	6		457	3	5

Continuación

D _{i,t}	H _{i,t}	CO _{k,t}	CS _{k,t}	Cb _{i,t}	SO _{i,k}	Sl _{i,k}
929	16	7	6	20	49	4
669	19	5	6	19	35	5
548	20	5	7	16	39	7
673	10	8	8	18	48	6
297	19	7	7	13	38	6
522	13	8	5	13	44	5
509	16	8	7	19	36	7
788	13	7	9	20	41	7
852	10	8	5	12	45	4
900	17	5	7	18	41	6
756	17	7	7	11	41	8
288	11	7	10	18	39	4
551	17	6	8	12	44	4
423	18	6	9	16	44	5
147	10	8	9	10	35	5
790	20	8	9	16	46	6
831	16	5	10	16	49	8
286	19	8	8	15	35	4
781	13	5	7	19	49	5
860	13	7	8	15	37	6
		5	6			
		7	7			
		8	7			
		7	9			
		7	9			
		6	10			
		7	9			
		7	5			
		5	7			
		8	6			
		5	5			
		5	8			
		5	9			
		6	5			
		7	8			
		7	9			
		5	5			
		5	6			
		6	8			
		8	10			
		6	8			
		8	7			
		6	10			
		8	6			
		5	6			
		6	9			
		7	7			
		6	9			
		8	7			
		8	7			

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

Segunda instancia

$D_{i,t}$	$H_{i,t}$	$CO_{k,t}$	$CS_{k,t}$	$Cb_{i,t}$	$SO_{i,k}$	$Sl_{i,k}$	LT_k	$KAP_{r,t}$	$TO_{k,r}$	$TS_{k,r}$	Continuación						
$D_{i,t}$	$H_{i,t}$	$CO_{k,t}$	$CS_{k,t}$	$Cb_{i,t}$	$SO_{i,k}$	$Sl_{i,k}$	LT_k	$KAP_{r,t}$	$TO_{k,r}$	$TS_{k,r}$	$D_{i,t}$	$H_{i,t}$	$CO_{k,t}$	$CS_{k,t}$	$Cb_{i,t}$	$SO_{i,k}$	$Sl_{i,k}$
226	17	6	5	11	46	4	1	490	5	5	617	17	6	10	16	36	5
320	11	6	5	17	41	4	2	486	4	8	357	20	5	10	15	39	5
122	15	7	6	19	44	6	1	496	5	10	235	10	8	5	12	43	8
478	18	5	10	18	49	6	2	467	3	9	361	11	7	7	15	35	6
310	15	7	9	11	48	7	2	453	2	5	886	20	6	6	20	41	6
150	12	5	10	20	50	4	1	467	4	10	210	14	8	9	19	35	6
391	18	7	7	14	40	8	1	444	5	7	197	18	7	5	14	42	7
570	12	5	10	19	44	5	1	469	4	5	476	18	6	7	16	48	7
272	12	7	9	13	47	7	2	468	5	6	540	15	7	10	18	36	4
266	17	5	10	11	47	5	2	499	2	7	588	11	8	6	13	48	6
889	13	6	5	10	50	5		405	2	6	443	11	7	5	18	47	4
652	17	6	5	13	41	7		411	5	7	877	16	7	10	13	45	4
223	14	7	10	16	40	8		496	4	9	239	11	6	8	18	35	4
610	14	6	7	11	36	7		437	5	5	110	12	6	9	11	50	5
828	20	8	6	15	36	6		466	4	6	736	15	8	9	17	41	5
175	17	6	9	13	46	5		452	4	6	422	14	5	9	11	36	7
755	19	7	7	15	48	5		421	5	8	463	10	6	9	14	39	4
156	18	7	7	19	38	5		487	2	5	819	13	8	7	12	41	4
812	11	7	5	18	41	6		491	3	5	412	19	6	7	16	40	5
883	10	8	8	13	37	4		430	3	8	492	19	8	7	13	44	6
600	15	5	7	13	49	4		404	2	8			6	5			
394	19	6	6	20	48	4		413	4	6			8	6			
349	14	7	7	14	48	7		440	3	7			5	6			
243	12	7	8	15	47	5		460	5	8			8	8			
561	11	8	6	16	49	8		494	5	9			7	8			
509	13	6	6	14	44	5		420	5	8			7	9			
904	17	5	5	10	46	5		496	5	6			8	8			
382	20	8	9	12	49	5		469	2	5			8	5			
808	14	8	6	12	38	4		421	4	5			6	6			
910	10	6	9	12	46	7		464	3	5			5	5			
842	12	7	10	13	46	5		462	2	6			5	10			
144	17	5	6	18	35	8		416	4	10			6	8			
199	16	6	10	10	47	6		481	5	5			6	8			
455	12	5	6	12	48	6		413	2	6			6	10			
827	12	7	10	18	46	5		487	4	8			8	7			
852	19	7	5	10	37	7		495	5	5			8	8			
115	12	7	8	10	46	6		444	2	5			6	10			
286	13	6	6	13	40	5		495	2	6			6	5			
195	15	7	6	14	39	6		416	4	5			6	7			
705	13	6	5	14	50	7		404	5	6			8	9			
977	19	6	7	13	46	6		440	3	5			7	8			
401	10	7	7	18	36	6		434	3	7			5	7			
750	10	8	10	10	49	5		478	5	5			6	10			
182	10	6	6	19	47	4		420	2	8			8	7			
984	11	6	9	16	35	6		468	3	8			6	6			
802	16	7	10	12	38	4		452	5	6			7	10			
393	18	6	9	13	49	5		445	2	5			8	7			
549	19	7	6	17	48	6		467	5	7			7	9			
559	14	6	6	12	44	4		500	3	6			5	8			
530	17	8	8	13	44	6		428	4	6			5	8			

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

Tercera instancia

$D_{i,t}$	$H_{i,t}$	$CO_{k,t}$	$CS_{k,t}$	$Cb_{i,t}$	$SO_{i,k}$	$SI_{i,k}$	LT_k	$KAP_{r,t}$	$TO_{k,r}$	$TS_{k,r}$	Continuación						
$D_{i,t}$	$H_{i,t}$	$CO_{k,t}$	$CS_{k,t}$	$Cb_{i,t}$	$SO_{i,k}$	$SI_{i,k}$					$D_{i,t}$	$H_{i,t}$	$CO_{k,t}$	$CS_{k,t}$	$Cb_{i,t}$	$SO_{i,k}$	$SI_{i,k}$
686	19	8	7	10	39	7	1	472	4	7	739	20	8	7	16	37	6
245	16	5	7	15	50	8	2	469	3	10	480	12	6	7	16	40	7
947	10	6	5	18	37	5	1	478	4	5	358	13	6	8	12	44	7
403	13	8	9	11	39	5	1	449	2	5	483	14	8	9	15	36	6
658	10	8	8	15	38	6	1	436	5	10	108	12	7	9	20	42	5
808	18	6	9	14	41	5	2	450	5	8	333	17	5	6	20	36	5
147	13	8	6	19	47	8	2	408	5	10	320	20	8	8	15	43	6
327	18	5	9	12	35	6	1	417	4	8	599	14	8	10	17	49	6
929	12	7	8	18	43	8	1	415	5	10	662	11	5	6	20	37	8
923	17	5	7	16	44	6	1	447	3	10	711	18	5	8	15	49	5
702	14	6	8	15	46	7		454	4	7	566	19	8	8	19	48	8
465	17	6	8	16	38	8		459	3	9	999	12	8	7	14	46	8
937	14	8	7	20	44	7		443	2	5	362	18	7	10	19	49	8
423	15	7	10	12	37	6		438	2	6	233	19	5	5	12	49	4
641	10	5	7	16	37	4		468	2	7	859	11	7	5	18	40	4
888	15	6	5	14	47	4		453	5	8	545	10	8	5	12	35	6
567	16	6	6	16	49	4		422	5	5	585	17	5	6	15	38	8
869	15	7	7	10	39	4		488	3	10	942	20	7	10	13	40	8
625	18	7	6	14	42	4		452	3	10	535	15	8	9	17	38	4
696	18	7	8	20	38	5		491	4	7	614	15	7	10	14	42	5
244	12	5	7	20	42	6		446	2	7							
939	16	6	6	16	40	7		455	3	5			5	8			
894	10	6	8	20	40	5		482	3	6			6	9			
789	20	7	9	11	40	7		401	2	8			7	9			
205	19	7	7	12	41	6		442	3	9			5	5			
153	10	5	7	10	37	7		468	3	8			5	6			
548	14	5	6	17	39	8		443	2	5			6	5			
927	17	7	10	19	41	8		416	4	5			6	7			
452	16	7	7	19	46	7		469	5	5			8	9			
554	13	6	10	18	38	5		412	5	5			6	8			
487	15	6	5	20	38	7		409	3	5			7	10			
689	20	6	7	13	43	5		464	2	9			8	8			
744	19	7	5	15	40	4		428	2	7			7	8			
###	14	6	7	16	41	8		462	3	8			8	5			
471	15	8	5	18	38	7		434	5	10			6	8			
919	11	8	5	10	46	4		442	2	7			6	8			
181	15	8	8	10	39	8		493	3	7			7	10			
352	16	8	7	13	48	7		443	3	9			7	5			
262	18	8	10	14	48	4		411	5	7			8	8			
772	15	7	9	15	42	5		500	2	8			6	9			
143	11	8	5	13	39	8		435	4	7			5	8			
468	13	8	5	18	45	8		429	4	10			7	6			
816	13	5	7	10	42	7		473	2	7			8	9			
249	13	7	10	20	39	6		415	3	5			7	6			
150	14	7	7	17	43	8		462	4	10			7	6			
868	19	5	7	13	47	5		447	2	8			5	9			
516	20	8	7	13	41	7		439	4	7			5	7			
672	11	8	8	18	41	8		462	2	9			8	9			
682	17	7	9	13	45	6		495	4	8			7	7			
653	20	5	10	14	45	8		423	5	7			6	8			

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

Cuarta instancia

$D_{i,t}$	$H_{i,t}$	$CO_{k,t}$	$CS_{k,t}$	$Cb_{i,t}$	$SO_{i,k}$	$SI_{i,k}$	LT_k	$KAP_{r,t}$	$TO_{k,r}$	$TS_{k,r}$	Continuación							
$D_{i,t}$	$H_{i,t}$	$CO_{k,t}$	$CS_{k,t}$	$Cb_{i,t}$	$SO_{i,k}$	$SI_{i,k}$	LT_k	$KAP_{r,t}$	$TO_{k,r}$	$TS_{k,r}$	$D_{i,t}$	$H_{i,t}$	$CO_{k,t}$	$CS_{k,t}$	$Cb_{i,t}$	$SO_{i,k}$	$SI_{i,k}$	
719	11	8	10	13	39	5	1	404	4	10	212	14	5	6	18	47	4	
955	19	8	10	11	43	6	1	483	3	6	430	18	7	8	15	35	5	
813	10	5	5	16	43	5	2	499	3	5	619	17	7	10	15	36	6	
998	20	5	5	13	46	6	2	450	5	10	322	12	5	5	19	45	8	
886	20	6	6	13	49	7	2	443	2	5	679	11	8	5	19	40	7	
558	18	5	5	13	38	5	2	438	2	6	481	14	7	7	17	50	6	
376	11	6	6	10	40	5	2	402	2	8	778	12	5	8	18	50	7	
612	10	7	8	12	46	4	1	456	2	6	213	20	5	9	17	45	7	
145	11	5	5	10	45	6	2	461	3	7	755	12	5	9	10	42	4	
195	15	7	6	19	38	8	2	473	3	10	642	11	6	5	11	35	4	
228	16	5	5	17	39	6		487	2	10	554	12	5	8	13	43	5	
948	18	5	9	17	47	7		473	5	5	819	15	5	5	20	39	6	
347	11	5	8	18	43	8		463	3	7	660	10	6	9	17	50	7	
312	15	8	7	17	41	4		493	4	10	363	17	5	6	11	41	6	
586	10	5	5	11	50	7		428	3	6	622	18	8	7	14	41	5	
665	13	6	9	14	45	6		495	3	5	562	18	5	10	14	50	5	
823	10	7	7	14	44	6		471	3	9	659	17	5	9	17	46	6	
956	10	7	8	20	39	8		417	3	6	593	16	6	8	14	40	6	
346	12	5	9	19	43	8		427	3	10	916	14	7	9	13	45	6	
671	12	5	10	13	48	6		449	3	8	151	12	8	10	18	49	7	
275	20	6	6	10	39	5		410	5	10			6	9				
547	20	7	10	15	43	8		400	2	8			6	5				
342	17	5	10	15	44	6		433	4	8			6	5				
293	16	6	10	17	36	8		406	5	7			6	5				
442	10	8	7	11	35	7		428	5	8			5	7				
869	20	7	5	20	43	8		460	3	6			6	9				
194	13	8	9	17	46	8		417	2	7			8	5				
150	14	6	5	19	49	8		425	4	5			8	9				
886	13	6	7	11	39	7		430	3	9			7	8				
144	20	8	10	14	40	4		480	2	9			8	10				
555	16	7	7	13	45	7		405	5	8			5	8				
586	14	6	9	10	35	4		466	3	10			6	5				
697	14	8	9	18	45	7		411	5	9			5	8				
785	15	7	5	14	35	6		451	2	10			5	10				
734	13	5	10	19	45	8		405	4	10			7	6				
591	15	6	10	14	38	6		419	2	6			5	9				
332	17	6	9	12	39	6		422	4	6			6	8				
559	19	7	10	10	38	6		454	3	9			7	8				
301	19	8	8	11	35	8		482	2	9			8	5				
388	11	6	9	10	38	6		451	3	8			5	8				
489	11	5	6	14	35	4		440	5	10			6	9				
870	13	5	5	17	38	6		415	5	7			8	5				
797	19	6	6	10	44	5		418	5	9			5	9				
961	17	6	7	15	38	7		442	2	10			5	8				
440	13	6	7	20	43	5		442	4	9			6	5				
990	16	7	7	17	44	7		407	2	10			6	10				
694	18	7	5	10	39	8		406	3	9			7	5				
682	14	8	5	15	36	7		410	3	10			7	8				
747	18	6	6	19	41	4		449	2	9			8	6				
296	11	6	10	14	46	6		431	2	10			7	10				
														5	9			

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

Quinta instancia

D _{i,t}	H _{i,t}	CO _{k,t}	CS _{k,t}	Cb _{i,t}	SO _{i,k}	SI _{i,k}	LT _k	KAP _{r,t}	TO _{k,r}	TS _{k,r}
585	17	7	6	16	35	6	2	431	5	10
173	13	7	6	11	46	6	1	428	4	7
876	17	8	5	13	49	8	2	438	5	8
331	20	7	9	12	35	8	1	409	2	8
276	18	8	8	16	49	4	2	496	2	10
116	15	6	9	17	37	8	2	496	4	8
357	20	8	7	10	44	6	2	454	4	10
536	18	7	10	15	49	4	2	479	5	8
237	18	5	9	20	35	5	1	440	3	9
232	13	7	5	19	36	4	1	471	3	10
911	20	8	5	18	39	4		478	4	7
674	13	5	5	20	46	7		484	3	8
245	10	7	10	12	43	7		467	4	10
632	10	5	7	13	36	6		454	5	6
850	17	7	5	18	36	4		484	5	7
197	12	6	8	15	46	4		470	5	7
776	14	7	6	17	48	4		439	5	8
981	13	7	5	11	38	8		403	5	7
737	17	8	10	10	41	8		445	5	7
808	16	5	6	16	35	7		485	2	10
355	10	6	5	13	45	6		439	4	10
150	15	8	10	19	43	7		488	5	8
105	19	8	6	13	43	5		414	5	5
900	17	8	7	14	43	7		434	2	7
317	16	5	10	16	44	6		474	4	8
265	19	7	10	13	40	7		400	4	7
660	11	6	9	20	42	8		476	3	5
138	14	5	7	11	44	6		449	5	10
563	19	5	10	11	43	5		401	3	10
666	16	7	7	11	36	8		445	2	10
598	18	8	8	12	35	5		442	5	5
800	12	6	10	17	40	8		497	3	9
856	11	6	8	18	37	7		497	4	10
985	17	6	10	20	38	7		430	5	10
456	18	8	8	15	35	5		403	3	6
481	14	7	9	11	43	7		411	4	6
308	16	7	9	15	36	6		461	5	6
478	18	7	8	18	46	6		411	5	8
388	19	8	8	19	45	7		433	4	6
898	17	6	7	20	39	8		421	5	7
269	13	7	9	18	36	6		457	3	6
594	15	7	9	12	42	5		451	3	5
943	15	5	5	15	39	4		407	5	8
375	14	7	8	14	36	7		449	5	6
276	15	7	5	10	41	5		497	2	6
994	20	8	5	18	44	7		481	5	9
642	11	7	5	18	45	8		474	2	8
798	12	7	6	11	45	5		496	4	10
808	19	7	7	17	41	8		429	2	9
779	10	5	8	18	41	5		457	4	8

Continuación

D _{i,t}	H _{i,t}	CO _{k,t}	CS _{k,t}	Cb _{i,t}	SO _{i,k}	SI _{i,k}
866	10	7	5	10	49	8
606	14	5	5	10	36	4
484	10	5	6	17	40	6
961	11	7	7	13	48	5
586	20	6	7	18	38	7
811	14	8	6	18	48	6
798	18	7	8	13	39	8
176	16	6	10	15	45	8
239	13	7	7	18	49	5
287	20	8	9	13	45	7
143	20	7	8	17	44	4
576	14	7	7	12	48	5
840	20	6	5	18	37	4
711	10	6	6	10	36	6
435	13	8	6	16	43	6
122	12	5	6	10	38	7
162	19	6	6	13	42	4
518	11	8	10	11	43	5
112	17	5	10	15	49	7
191	17	6	10	12	36	8
		8	10			
		7	6			
		8	6			
		7	7			
		7	8			
		6	8			
		8	7			
		8	10			
		5	6			
		8	7			
		5	5			
		5	9			
		5	10			
		6	6			
		7	9			
		7	10			
		5	5			
		5	7			
		7	9			
		5	5			
		8	9			
		6	8			
		7	5			
		6	7			
		6	7			
		8	7			
		8	10			
		7	6			
		6	5			
		5	5			

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

Sexta instancia

$D_{i,t}$	$H_{i,t}$	$CO_{k,t}$	$CS_{k,t}$	$Cb_{i,t}$	$SO_{i,k}$	$SI_{i,k}$	LT_k	$KAP_{r,t}$	$TO_{k,r}$	$TS_{k,r}$	Continuación							
$D_{i,t}$	$H_{i,t}$	$CO_{k,t}$	$CS_{k,t}$	$Cb_{i,t}$	$SO_{i,k}$	$SI_{i,k}$	LT_k	$KAP_{r,t}$	$TO_{k,r}$	$TS_{k,r}$	$D_{i,t}$	$H_{i,t}$	$CO_{k,t}$	$CS_{k,t}$	$Cb_{i,t}$	$SO_{i,k}$	$SI_{i,k}$	
256	16	5	10	10	35	6	1	468	2	5	931	17	5	5	18	47	5	
774	13	6	10	15	44	5	1	480	2	6	104	18	6	6	18	46	4	
800	17	5	10	17	36	7	1	465	4	6	493	16	6	10	20	37	8	
340	15	5	10	16	42	6	1	420	2	9	651	20	6	7	10	40	5	
239	16	5	10	18	49	7	2	453	3	7	154	14	7	5	20	47	4	
805	13	6	8	12	43	5	1	496	2	6	138	20	6	5	14	44	8	
725	11	8	10	20	45	6	1	493	2	6	862	11	5	6	19	40	6	
297	19	6	8	13	48	5	1	488	3	5	946	13	7	7	10	44	4	
937	15	5	9	11	35	6	1	455	4	5	791	13	6	10	11	49	6	
985	19	5	7	15	42	6	1	477	5	7	262	20	8	7	20	44	7	
749	10	5	10	18	43	6		460	4	5	627	19	8	9	12	49	6	
509	10	5	5	16	48	6		476	3	7	294	12	8	5	12	46	4	
487	10	8	5	16	39	7		486	5	10	339	16	6	5	14	44	4	
221	11	6	5	18	38	4		494	3	10	738	18	6	8	10	44	7	
530	12	7	5	13	41	4		412	2	8	198	15	7	10	13	37	8	
770	20	8	7	19	46	5		440	4	5	941	15	5	7	16	44	8	
389	17	6	6	19	50	4		406	3	5	189	16	5	10	10	48	6	
643	11	6	8	13	43	4		489	5	6	298	13	5	6	16	42	5	
384	15	8	10	19	49	4		469	2	5	624	10	7	10	18	49	4	
442	14	7	10	18	42	7		496	5	9	497	10	8	8	10	41	6	
526	19	8	7	10	48	7		433	2	5			8	7				
695	11	7	7	13	37	6		419	2	10			7	8				
330	11	5	8	19	44	5		498	5	5			7	7				
757	15	7	6	14	35	5		402	4	10			7	5				
810	10	7	8	17	48	4		477	5	10			5	7				
557	14	8	9	16	37	8		428	2	10			8	8				
515	20	7	9	11	44	4		404	4	8			5	9				
968	16	5	7	14	47	7		489	4	10			7	9				
554	15	8	8	16	48	6		420	5	5			7	9				
237	10	7	10	10	50	4		445	4	5			8	6				
520	10	7	9	16	41	6		457	2	5			7	8				
481	19	5	10	20	45	8		458	5	10			8	6				
613	10	8	5	17	38	7		470	2	5			7	8				
435	14	8	7	19	37	6		420	2	9			6	9				
396	11	5	5	17	39	5		469	4	9			7	10				
511	20	8	7	13	43	4		426	5	10			8	8				
730	13	8	8	12	40	6		414	5	8			6	6				
732	15	6	6	13	36	7		447	5	8			5	6				
423	19	8	5	11	42	6		457	4	10			8	5				
589	10	8	9	14	35	4		413	5	7			6	7				
562	16	8	9	17	48	6		469	5	6			5	9				
915	10	7	9	12	40	5		472	4	6			6	6				
245	19	8	8	14	40	8		440	2	10			5	5				
668	16	7	8	17	50	7		481	2	10			7	9				
213	18	6	9	12	47	5		488	2	5			8	10				
278	15	6	10	16	47	5		402	2	7			6	9				
603	12	8	9	12	45	6		484	4	9			5	7				
870	18	7	6	18	41	6		491	4	8			8	7				
158	10	5	7	18	49	7		443	2	5			7	7				
168	19	5	8	11	37	6		450	5	8			8	6				

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

Séptima instancia

Di,t	Hi,t	CO _{k,t}	CS _{k,t}	Cb _{i,t}	SO _{i,k}	SI _{i,k}	LT _k	KAP _{r,t}	TO _{k,r}	TS _{k,r}	Continuación							
202	20	5	7	14	47	7	1	496	3	6	Di,t	Hi,t	CO _{k,t}	CS _{k,t}	Cb _{i,t}	SO _{i,k}	SI _{i,k}	
213	14	7	9	16	48	5	1	428	5	9	631	15	7	5	20	43	6	
872	15	6	8	10	40	7	2	406	2	8	319	17	5	5	14	46	8	
881	19	7	8	10	41	5	2	418	2	8	861	12	6	7	12	46	5	
532	13	6	5	15	45	5	2	479	5	6	965	10	6	5	18	39	6	
366	17	6	5	18	49	4	2	491	4	8	653	12	6	7	12	40	7	
415	12	7	7	16	40	5	1	456	3	6	241	12	7	10	17	39	7	
871	13	8	9	14	50	8	2	409	4	6	575	16	7	9	17	41	4	
244	17	5	7	17	47	7	2	447	5	7	263	10	6	5	18	41	4	
562	15	8	6	18	50	5	2	459	5	9	718	19	5	6	11	37	6	
959	12	7	6	15	37	6		410	2	5	699	11	6	7	17	49	5	
431	12	7	9	15	40	4		407	3	6	332	17	8	9	14	41	5	
904	14	6	5	14	39	5		467	5	6	745	11	5	6	11	44	5	
568	14	6	8	13	37	8		412	2	8	409	10	5	7	15	49	8	
411	16	6	7	17	39	6		447	2	9	728	15	7	10	18	48	5	
935	11	6	8	19	39	6		410	3	8	800	19	6	8	12	43	8	
947	14	8	8	18	40	8		444	2	5	556	11	8	10	12	48	8	
672	16	6	5	11	37	5		445	4	10	314	16	5	10	15	48	5	
568	13	5	7	19	47	7		418	2	9	148	20	5	7	14	41	4	
108	10	7	7	12	43	4		445	5	8	405	14	6	9	16	41	5	
798	20	7	9	16	46	7		427	5	10	901	16	7	10	20	41	5	
347	13	8	8	19	37	5		483	2	6			5	8				
590	12	5	9	14	47	8		489	2	7			7	7				
999	10	5	8	11	48	8		438	4	8			7	6				
988	10	8	10	18	41	6		443	3	10			6	7				
121	15	5	10	13	47	8		477	4	10			7	10				
894	20	6	5	18	36	6		470	3	10			8	8				
503	16	5	8	20	38	8		409	5	5			7	8				
269	11	8	8	13	49	5		464	3	6			6	7				
773	16	6	10	11	49	7		424	3	6			8	9				
768	15	7	9	20	38	5		481	2	6			6	6				
334	17	6	6	18	41	7		438	2	7			7	7				
759	11	7	5	19	37	7		487	5	8			5	7				
663	18	6	7	18	44	4		456	3	10			5	10				
767	14	8	8	11	38	5		498	5	8			7	7				
908	11	5	6	14	45	4		445	4	5			8	10				
173	20	6	8	12	42	5		470	2	6			6	7				
338	14	8	5	11	45	4		418	4	9			5	10				
957	13	7	9	17	41	7		494	4	9			6	5				
606	16	5	9	19	37	6		411	3	6			6	10				
732	15	6	7	17	49	6		485	2	5			6	6				
705	15	5	10	11	42	6		461	3	5			7	7				
727	16	7	8	12	50	7		473	2	5			8	8				
825	17	5	6	11	43	6		483	5	10			6	5				
489	11	7	7	15	48	5		477	2	6			8	9				
300	15	7	6	20	44	6		461	3	10			7	6				
474	19	5	9	14	44	5		486	4	6			7	8				
431	18	5	7	15	38	8		458	5	10			5	6				
111	12	6	7	18	37	8		429	4	9			7	10				
165	16	5	5	16	43	5		439	2	5			7	10				
														6	8			

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

Octava instancia

$D_{i,t}$	$H_{i,t}$	$CO_{k,t}$	$CS_{k,t}$	$Cb_{i,t}$	$SO_{i,k}$	$Sl_{i,k}$	LT_k	$KAP_{r,t}$	$TO_{k,r}$	$TS_{k,r}$	Continuación						
$D_{i,t}$	$H_{i,t}$	$CO_{k,t}$	$CS_{k,t}$	$Cb_{i,t}$	$SO_{i,k}$	$Sl_{i,k}$	LT_k	$KAP_{r,t}$	$TO_{k,r}$	$TS_{k,r}$	$D_{i,t}$	$H_{i,t}$	$CO_{k,t}$	$CS_{k,t}$	$Cb_{i,t}$	$SO_{i,k}$	$Sl_{i,k}$
498	11	8	9	12	37	6	2	491	2	10	460	12	5	5	16	50	7
477	15	8	8	13	47	5	2	486	3	6	571	11	8	9	11	50	7
273	10	7	10	12	49	7	2	448	5	7	366	14	6	6	15	35	6
591	17	6	8	10	40	8	1	488	5	10	108	15	8	6	10	39	8
988	17	5	9	13	35	8	2	443	5	6	389	20	7	9	16	38	8
457	11	6	6	16	42	7	2	490	4	6	576	14	5	7	20	48	6
931	18	7	7	12	37	8	2	474	3	6	888	12	7	7	13	48	6
172	15	8	6	11	42	4	2	495	4	5	559	18	5	5	17	41	5
676	10	7	8	15	36	5	1	423	5	7	856	20	5	7	11	47	5
964	15	7	9	20	36	5	1	411	4	8	875	11	5	9	14	43	7
314	18	8	7	16	37	8		419	2	5	632	15	7	6	13	47	5
941	14	8	7	20	42	8		499	5	6	458	16	5	7	15	44	7
413	12	7	10	20	45	8		447	5	6	293	17	6	6	18	37	8
852	15	7	6	13	37	4		452	5	9	127	10	7	5	10	45	4
402	16	7	5	18	43	5		429	4	7	654	16	7	7	20	35	7
852	11	8	10	18	46	4		415	2	7	634	18	7	5	17	41	7
193	14	8	10	16	36	6		449	3	5	429	10	8	7	11	42	6
127	15	8	8	10	50	8		472	2	9	973	19	6	8	10	42	6
116	15	6	6	11	46	4		477	2	7	241	17	8	6	18	49	5
150	20	6	5	17	36	8		437	5	5	838	16	5	5	18	42	6
501	11	8	7	11	50	6		457	5	10			5	6			
334	15	8	7	11	43	7		464	4	10			5	8			
785	19	8	10	18	41	6		490	3	8			5	7			
219	20	8	9	17	46	4		405	2	8			5	8			
861	11	6	5	12	44	8		435	5	8			7	10			
202	13	6	8	11	39	4		447	2	9			5	10			
168	15	6	6	10	35	7		448	2	8			8	5			
510	11	5	5	11	37	7		418	5	9			5	5			
120	18	5	10	15	35	8		400	5	10			5	8			
740	15	6	7	18	42	7		400	5	7			6	9			
200	16	8	10	20	40	4		425	3	8			7	8			
589	19	7	10	13	43	5		400	4	7			7	9			
561	20	7	6	10	38	8		402	3	10			5	10			
857	15	6	8	15	39	8		473	5	5			8	10			
561	14	6	10	10	46	5		447	2	10			7	6			
309	14	6	9	15	47	6		476	4	7			6	9			
798	10	7	7	17	37	6		455	4	9			8	9			
600	14	5	8	10	49	8		498	5	10			7	10			
743	11	5	9	17	35	6		420	2	5			6	9			
962	13	5	8	19	39	7		470	5	6			6	6			
909	14	7	6	14	39	4		495	3	5			5	6			
189	13	6	9	14	39	4		421	5	7			6	10			
729	20	5	8	10	47	5		491	3	8			5	7			
349	15	7	8	18	46	4		428	4	5			8	9			
814	14	5	8	11	38	8		418	2	9			7	6			
925	10	5	6	16	47	6		497	3	10			6	9			
327	16	6	9	13	40	8		414	5	8			5	7			
206	16	7	10	14	45	8		433	3	10			6	8			
118	11	7	6	17	42	5		455	2	5			6	6			
129	16	7	6	18	37	7		415	3	7			8	5			

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

Novena instancia

D _{i,t}	H _{i,t}	CO _{k,t}	CS _{k,t}	Cb _{i,t}	SO _{i,k}	SI _{i,k}	LT _k	KAP _{r,t}	TO _{k,r}	TS _{k,r}	Continuación						
D _{i,t}	H _{i,t}	CO _{k,t}	CS _{k,t}	Cb _{i,t}	SO _{i,k}	SI _{i,k}					D _{i,t}	H _{i,t}	CO _{k,t}	CS _{k,t}	Cb _{i,t}	SO _{i,k}	SI _{i,k}
252	14	5	8	16	42	8	1	474	5	7	209	15	7	10	14	35	5
346	16	6	8	13	40	8	2	471	4	9	850	18	5	10	12	37	6
147	20	7	8	15	44	6	1	480	4	5	729	19	5	5	20	41	8
504	12	5	6	14	45	6	1	445	2	10	854	19	7	6	11	50	7
336	20	6	5	18	44	6	2	431	2	6	479	20	7	6	17	40	7
176	14	8	6	17	48	4	1	445	4	10	704	14	8	9	17	49	6
417	20	6	10	11	36	7	2	403	4	5	690	17	7	5	12	41	8
596	14	8	7	16	41	5	2	429	3	9	970	16	7	7	13	46	8
298	13	6	5	20	43	6	1	497	3	10	132	12	8	9	16	50	5
292	19	6	8	18	43	4	2	427	3	5	180	20	5	6	11	49	7
971	15	7	8	18	46	8		434	4	5	937	20	7	5	15	49	4
734	19	7	9	20	49	5		439	3	5	469	13	7	10	11	47	5
305	15	8	8	13	47	6		423	2	9	733	19	6	7	16	36	4
692	16	7	5	16	40	5		472	2	10	604	20	6	9	20	35	4
910	11	8	8	17	41	8		400	2	5	497	12	8	9	14	42	4
201	16	7	5	14	35	7		481	2	5	127	12	5	8	20	37	6
781	19	8	9	16	37	8		469	2	6	168	19	6	9	11	41	8
182	17	5	9	10	43	8		433	4	9	524	11	8	7	10	43	8
573	10	5	8	19	44	8		438	5	8	117	16	5	6	14	41	4
644	12	6	10	15	41	7		478	2	6	196	16	8	7	10	45	5
192	16	7	7	15	35	6		432	4	6			6	5			
887	10	8	6	13	36	7		441	5	10			7	10			
843	15	5	7	17	36	8		468	5	8			8	10			
737	14	5	9	18	36	6		482	2	5			7	6			
154	12	5	7	20	37	4		422	3	6			7	7			
102	15	7	7	18	49	6		448	3	10			6	7			
496	18	7	5	14	35	6		423	2	8			8	6			
875	10	5	10	15	37	6		498	4	7			7	9			
400	15	5	6	15	41	5		449	5	7			5	5			
502	12	8	9	15	49	8		463	3	8			8	10			
435	14	7	10	16	49	5		461	2	9			5	8			
637	16	8	6	10	38	8		414	5	7			5	5			
693	15	5	5	11	35	7		479	5	8			5	6			
949	10	8	7	12	36	7		412	2	8			6	8			
419	10	7	5	15	44	6		486	4	10			7	5			
445	17	6	6	18	36	8		405	5	7			7	6			
608	10	6	9	18	44	7		456	2	7			5	7			
779	12	6	7	10	37	6		406	2	9			5	9			
633	13	6	7	11	37	8		428	4	8			8	5			
242	11	5	6	12	47	4		416	5	8			6	7			
514	18	6	9	10	44	7		451	3	7			5	5			
838	19	7	8	15	50	7		445	3	10			7	10			
286	19	8	5	19	47	6		490	5	7			8	7			
619	19	6	7	17	44	5		431	2	5			7	9			
521	20	6	10	14	48	7		479	3	5			7	9			
338	14	8	5	10	35	4		464	2	9			5	6			
887	15	7	10	10	46	6		456	3	7			5	10			
142	17	7	6	15	46	7		479	2	10			5	6			
152	12	6	6	10	42	5		411	4	8			7	5			
123	15	8	8	11	42	7		439	5	7			7	5			

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

Decima instancia

$D_{i,t}$	$H_{i,t}$	$CO_{k,t}$	$CS_{k,t}$	$Cb_{i,t}$	$SO_{i,k}$	$Sl_{i,k}$	LT_k	$KAP_{r,t}$	$TO_{k,r}$	$TS_{k,r}$	Continuación						
$D_{i,t}$	$H_{i,t}$	$CO_{k,t}$	$CS_{k,t}$	$Cb_{i,t}$	$SO_{i,k}$	$Sl_{i,k}$					$D_{i,t}$	$H_{i,t}$	$CO_{k,t}$	$CS_{k,t}$	$Cb_{i,t}$	$SO_{i,k}$	$Sl_{i,k}$
909	16	8	7	11	36	8	2	410	5	8	394	10	8	6	15	42	7
188	10	5	10	16	40	6	1	462	3	10	673	20	8	10	20	48	7
790	13	7	9	10	47	6	2	434	4	7	737	16	5	5	19	40	4
784	16	5	5	11	43	4	2	465	2	6	785	12	5	7	14	48	7
563	12	6	9	11	47	4	2	472	5	6	641	13	8	8	10	36	8
565	16	5	10	14	38	6	2	459	4	7	173	17	5	6	14	50	4
192	13	7	9	14	37	7	2	442	2	9	676	12	7	10	11	39	4
340	12	6	6	18	46	6	1	491	3	5	308	13	7	10	12	50	5
558	17	7	8	20	46	4	1	446	3	6	933	16	5	8	17	41	6
144	15	5	6	20	37	4	2	405	2	5	859	18	6	8	12	36	7
484	14	7	6	11	44	8		482	3	6	660	10	7	9	14	39	4
857	13	6	10	13	45	8		473	2	9	115	13	5	7	13	41	4
374	18	6	8	12	48	8		451	5	8	849	10	7	6	17	40	5
684	17	7	5	19	45	7		472	2	6	689	18	5	7	14	45	7
893	11	5	10	12	39	7		453	4	6	930	13	7	5	19	50	5
688	15	6	9	16	42	8		435	5	10	208	18	8	8	13	38	8
643	10	7	10	20	42	4		462	5	6	811	17	6	6	18	41	4
593	11	6	6	13	42	6		482	2	7	636	12	8	8	16	41	8
911	19	6	10	12	43	6		449	3	8	415	19	5	8	15	44	8
859	10	8	10	18	47	8		455	2	5	178	12	5	9	18	35	5
353	12	8	7	14	49	7		430	5	9			6	8			
971	15	6	7	17	36	7		403	3	10			5	5			
989	19	6	10	17	45	7		456	5	10			6	8			
190	20	5	5	16	50	4		499	4	10			5	5			
123	11	7	7	18	50	7		404	3	5			6	10			
325	11	7	10	14	39	5		432	2	8			6	10			
620	10	8	6	11	40	5		402	2	7			6	8			
637	16	6	10	12	41	8		436	3	8			7	5			
164	19	8	7	19	38	6		409	2	6			8	9			
189	12	5	9	11	43	8		416	2	7			5	8			
352	16	5	10	10	47	7		467	2	7			6	10			
763	10	5	8	14	45	6		444	3	9			5	5			
433	20	5	7	15	40	7		420	5	8			6	9			
791	18	7	7	16	35	4		408	2	9			8	9			
161	13	8	9	14	36	7		444	5	8			8	8			
726	15	5	9	19	43	7		438	4	5			6	6			
835	16	6	6	12	36	6		482	2	6			6	9			
267	14	7	10	10	37	6		423	4	6			5	6			
408	15	7	5	18	41	8		471	4	10			5	7			
281	12	8	6	12	37	4		483	2	8			7	9			
830	10	5	5	13	48	5		481	4	8			7	7			
747	12	5	6	17	36	8		403	2	10			7	9			
756	18	8	8	12	44	5		409	5	8			5	7			
728	10	6	9	13	44	8		438	5	9			5	8			
814	10	7	5	16	36	5		480	3	10			5	5			
554	13	7	5	18	39	6		482	5	10			5	9			
433	14	5	6	12	43	7		400	2	8			5	9			
558	14	8	9	15	35	6		419	5	9			8	7			
183	13	8	7	12	41	6		409	3	6			8	9			
647	18	6	10	20	35	5		466	2	6			5	9			

ANEXO 2: Ejemplo de instancia del banco presentado en el capítulo quinto

Adjunto se presentan los datos que se encuentran en el fichero de texto (Par00_ST_CV10_P1_R00_1.csv) como muestra de una de las instancias:

```
Pareto;Par00
Tipo_demanda;ST
Incertidumbre;CV10
BOM;P1
Saturacion;R00
Instancia;1
Productos_padre;10
Productos;50
Periodos;8
Rodantes;52
RodantesPrev;12
Recursos;5
Strokes;50
M;50000
Gap_Gurobi/100000b;1000
Lim_timp_Gurobi;3000

Demanda Dit;
;47;59;67;70;73;77;84;92;89;99;100;104;104;95;101;96;95;91;91;90;82;75;69;67;57;59;46;47;40;31;31;26;22;20;16;16;18;8;16;9;11;15;18;29;30;33;4
2;43;46;54;61;72;80;80;86;89;100;103;110;114;114;122;120;120;123;122;125;121;122;123;113
;48;57;63;70;71;84;82;93;93;99;99;100;97;103;103;98;92;91;90;83;83;79;70;71;62;52;48;47;39;30;31;29;19;14;11;12;12;15;10;9;13;17;25;25;29;28;4
3;43;51;58;60;65;71;84;90;96;97;106;106;109;119;120;122;124;123;128;124;120;123;119;110
;49;52;61;73;71;82;86;86;91;91;101;95;103;102;100;100;97;92;89;82;86;80;69;67;65;52;50;43;43;37;33;29;17;21;21;9;16;16;12;18;17;15;23;29;32;3
2;40;47;54;52;65;73;72;81;85;96;104;109;105;109;114;118;122;126;124;120;120;119;124;118;119
;52;61;62;68;75;84;82;90;91;94;99;98;102;105;104;98;98;93;87;84;87;82;73;70;60;61;47;46;43;34;31;21;22;16;12;9;16;7;16;17;17;14;22;25;29;37;41
;47;50;56;61;71;75;79;93;98;98;107;105;115;120;122;126;129;129;126;130;123;125;122;118
;52;59;62;69;77;76;89;85;92;91;97;94;98;95;104;98;94;92;87;89;78;83;69;62;57;55;53;47;35;39;28;31;25;22;19;9;9;14;10;15;15;17;21;23;27;34;38;4
9;45;51;64;65;76;77;89;96;100;104;110;112;117;116;119;125;129;124;123;123;119;123;114
;51;53;63;66;76;78;88;90;91;100;100;101;105;96;96;96;98;91;85;87;85;74;78;64;60;55;46;45;45;33;35;28;18;20;11;9;9;16;18;12;17;20;16;22;31;33;3
4;43;52;52;64;67;72;80;90;94;97;103;115;111;115;117;124;119;130;120;125;122;117;115;112
;54;54;64;72;80;85;86;88;96;93;99;103;104;102;102;97;100;99;91;90;85;82;76;63;62;52;46;44;43;40;33;24;23;24;19;10;15;12;16;13;16;21;16;29;31;
32;41;43;47;57;64;68;75;80;87;99;100;105;108;117;122;116;124;128;126;122;123;127;125;120;118
;48;54;58;65;79;82;88;88;87;94;100;95;97;98;98;101;93;94;93;88;78;74;78;68;62;54;48;44;40;31;34;26;24;22;14;11;13;9;12;11;17;13;18;23;25;38;37
;45;47;55;57;67;70;87;89;91;98;104;112;115;116;119;127;128;125;121;125;122;126;114;113
;45;52;63;74;70;84;85;88;92;100;100;95;95;95;101;97;99;91;86;92;78;78;78;71;59;53;50;50;36;35;35;28;19;15;11;12;13;17;14;11;18;12;16;26;31;31;
42;48;54;58;65;66;79;77;85;94;95;107;113;117;116;120;121;119;130;120;129;128;126;116;119
;53;58;66;66;71;79;82;84;97;94;99;94;99;102;103;101;92;99;91;84;86;75;77;71;59;59;46;48;43;34;34;30;24;22;21;15;9;16;8;9;18;18;23;22;32;32;42;
42;46;53;65;74;74;87;83;95;103;109;115;112;115;120;121;125;125;127;124;124;124;115;117

DemandaNPeriodos_it_ro;0
;47;59;67;70;73;77;84;92
;48;57;63;70;71;84;82;93
;49;52;61;73;71;82;86;86
;52;61;62;68;75;84;82;90
;52;59;62;69;77;76;89;85
;51;53;63;66;76;78;88;90
;54;54;64;72;80;85;86;88
;48;54;58;65;79;82;88;88
;45;52;63;74;70;84;85;88
;53;58;66;66;71;79;82;84

DemandaNPeriodos_it_ro;1
;52;53;79;62;72;80;112;105
;66;50;81;71;77;76;103;97
;48;51;147;83;90;85;85;110
;66;54;102;76;96;81;80;99
;67;71;58;86;76;102;117;79
;39;76;50;86;80;81;109;99
;59;69;70;105;88;89;111;104
```


Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

;52;50;64;76;99;94;71;106
;59;59;81;81;103;77;93;94
;51;60;79;78;94;61;72;111

DemadaNPeriodos_it_ro;2
;70;52;74;90;96;63;66;92
;83;53;70;98;74;107;74;123
;49;77;63;57;87;95;79;95
;65;80;47;96;84;127;104;84
;53;42;66;87;86;87;113;115
;52;63;77;83;81;84;66;90
;56;46;77;95;83;83;128;103
;48;52;26;80;75;63;71;90
;77;98;80;87;86;81;102;89
;63;67;73;62;78;78;73;97

DemadaNPeriodos_it_ro;3
;65;65;76;94;83;86;101;117
;76;57;94;96;107;88;110;98
;66;63;82;79;75;102;48;101
;74;67;85;68;86;101;95;97
;69;93;83;92;80;79;111;84
;73;65;72;100;79;106;97;111
;66;77;84;93;97;128;76;89
;72;104;68;62;97;74;78;77
;85;79;87;76;107;86;118;100
;62;63;76;92;99;91;100;113

DemadaNPeriodos_it_ro;4
;72;77;73;124;77;117;92;86
;86;85;76;72;97;87;109;112
;91;68;101;82;91;103;102;90
;63;108;81;89;82;103;114;140
;92;82;94;55;102;79;104;84
;85;78;85;97;91;98;94;113
;72;98;89;93;120;91;98;54
;88;80;90;8;94;101;95;109
;72;77;108;65;54;125;115;95
;65;59;81;89;103;75;219;54

DemadaNPeriodos_it_ro;5
;62;89;105;86;94;105;79;130
;60;74;84;135;106;73;92;65
;74;95;104;83;73;93;85;115
;74;121;110;74;77;110;114;99
;87;72;76;83;95;103;95;72
;68;75;105;67;88;98;76;117
;75;89;82;89;103;104;135;93
;82;78;74;104;79;113;109;88
;78;77;62;101;103;90;111;131
;87;116;89;111;92;106;86;106

DemadaNPeriodos_it_ro;6
;185;90;86;106;77;91;79;110
;152;100;85;79;87;86;109;99
;85;113;66;90;92;93;95;112
;82;88;93;107;94;119;111;61
;108;62;113;96;89;75;108;96
;91;102;81;98;88;114;100;130
;83;57;91;78;111;122;100;99
;113;90;86;86;90;111;106;116
;90;92;87;115;82;123;97;114
;90;93;62;111;109;112;113;102

DemadaNPeriodos_it_ro;7
;75;82;121;94;78;88;73;119
;103;46;84;105;76;111;116;136
;110;111;42;90;70;113;88;83
;92;98;103;96;103;78;130;98

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

;101;144;88;101;108;76;102;117
;83;70;90;103;88;92;102;88
;82;107;121;77;94;118;117;102
;80;74;80;112;95;104;180;116
;144;96;121;112;93;94;86;137
;89;87;136;111;102;110;105;105

DemadaNPeriodos_it_ro;8
;96;102;109;96;123;102;95;116
;78;94;74;85;89;94;97;89
;89;105;110;109;93;97;82;101
;101;117;93;110;103;84;99;63
;83;81;102;109;97;105;91;98
;83;92;90;114;116;118;107;95
;92;81;108;96;101;106;116;74
;79;97;93;103;107;100;118;96
;67;97;116;99;88;86;91;111
;104;119;90;87;53;108;107;109

DemadaNPeriodos_it_ro;9
;108;94;73;107;104;0;82;76
;113;89;116;104;96;0;100;97
;81;118;106;95;61;103;116;102
;87;92;87;95;112;128;92;101
;84;83;83;109;101;80;89;66
;92;116;107;83;94;105;99;106
;88;95;125;121;85;126;99;131
;95;68;51;93;41;69;92;87
;109;107;83;100;106;134;101;105
;73;134;103;105;141;17;91;74

DemadaNPeriodos_it_ro;10
;94;113;56;109;0;77;73;93
;74;90;142;111;119;110;111;110
;115;88;104;102;96;106;76;93
;84;90;121;86;47;88;102;83
;104;88;109;129;122;116;124;104
;128;111;116;113;90;46;104;83
;96;114;92;96;91;56;115;85
;115;103;105;145;113;180;98;94
;113;106;85;134;54;94;94;120
;121;82;105;94;116;121;113;93

DemadaNPeriodos_it_ro;11
;113;113;136;104;95;102;93;59
;89;106;111;117;113;78;79;78
;106;91;93;111;82;108;94;85
;82;95;99;152;93;86;96;85
;84;120;117;96;97;82;128;81
;147;98;104;75;103;91;47;67
;107;102;111;138;121;92;110;79
;91;102;100;117;123;88;103;69
;84;89;87;87;88;109;63;89
;77;96;108;135;105;110;162;76

DemadaNPeriodos_it_ro;12
;98;88;103;102;84;92;105;94
;101;75;46;116;61;110;125;98
;115;19;108;107;66;100;81;67
;95;97;99;82;103;102;61;89
;98;115;114;84;97;109;82;91
;96;105;95;114;111;73;79;101
;93;106;109;81;126;109;86;82
;102;98;108;110;92;94;103;128
;61;80;100;90;111;79;84;90
;90;97;98;113;85;99;92;78

DemadaNPeriodos_it_ro;13
;94;101;117;103;96;112;89;50

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

;91;89;93;107;99;85;81;73
;90;84;88;0;96;130;109;87
;0;96;115;105;64;74;76;86
;89;31;148;79;76;80;91;64
;105;92;84;106;118;65;97;86
;180;102;106;92;106;69;105;93
;87;112;100;100;67;49;77;70
;110;84;96;114;87;84;129;86
;120;100;141;115;88;86;89;89

DemadaNPeriodos_it_ro;14
;141;87;77;83;97;97;91;71
;97;93;90;111;99;86;74;74
;79;92;66;104;79;72;80;86
;92;91;121;57;101;75;80;87
;102;97;86;70;180;76;71;88
;165;89;101;125;106;81;81;67
;93;92;87;97;101;99;99;81
;96;94;79;90;109;79;89;76
;91;81;94;711;80;113;82;64
;45;110;103;108;99;117;127;0

DemadaNPeriodos_it_ro;15
;91;91;103;87;141;71;73;83
;101;0;80;84;97;71;61;77
;88;105;83;83;76;78;89;66
;80;90;100;96;110;98;87;99
;95;106;100;47;106;65;73;77
;103;96;97;87;65;77;78;75
;105;89;102;98;68;76;93;71
;135;101;88;84;76;67;105;62
;90;122;90;85;101;87;86;95
;103;89;39;115;89;99;85;69

DemadaNPeriodos_it_ro;16
;98;97;86;127;90;71;58;78
;96;88;84;66;81;76;64;61
;96;83;45;84;71;62;61;79
;117;93;69;91;67;92;71;74
;111;122;64;98;89;154;68;58
;22;83;73;93;59;80;80;61
;116;106;132;79;49;80;86;54
;104;98;109;72;74;79;89;57
;104;63;71;66;81;24;76;76
;102;100;81;113;99;89;82;64

DemadaNPeriodos_it_ro;17
;116;106;75;57;68;117;61;52
;58;111;76;94;67;62;70;67
;102;29;86;66;70;58;51;53
;95;101;70;85;88;59;74;56
;85;128;125;80;136;45;61;44
;59;93;456;89;73;76;62;63
;93;77;88;65;84;85;44;65
;98;54;87;74;76;74;62;59
;94;73;81;92;63;72;90;68
;84;85;90;80;70;87;63;62

DemadaNPeriodos_it_ro;18
;98;89;74;74;70;72;56;64
;93;95;92;36;61;66;58;57
;99;94;83;74;74;63;63;49
;97;95;97;74;70;70;69;60
;78;96;69;81;55;73;72;49
;84;88;89;89;76;112;39;5
;73;89;74;75;79;71;66;71
;102;111;91;82;98;76;53;58
;81;89;74;73;75;33;52;56

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

;49;76;68;70;90;84;68;74

DemandaNPeriodos_it_ro;19

;100;71;78;74;60;53;55;51
;99;76;87;73;35;55;58;42
;74;78;72;66;57;41;66;49
;108;105;55;66;84;71;72;40
;102;81;75;64;83;0;53;48
;91;88;88;115;63;40;59;40
;213;77;85;74;58;56;31;52
;91;84;69;148;76;57;78;34
;97;96;73;93;79;55;70;45
;78;89;79;89;81;58;77;43

DemandaNPeriodos_it_ro;20

;39;63;99;67;54;58;60;47
;75;91;53;64;52;45;54;49
;92;103;54;57;75;67;43;48
;113;96;59;103;54;66;54;43
;94;88;78;70;45;49;101;44
;83;72;67;79;51;43;47;50
;57;95;57;40;65;53;60;40
;84;68;85;61;59;52;52;51
;82;86;94;67;63;79;43;52
;98;68;82;63;45;114;54;43

DemandaNPeriodos_it_ro;21

;96;70;76;60;86;40;42;39
;80;194;72;47;50;53;47;53
;87;80;66;66;52;59;41;38
;85;66;80;28;63;41;39;42
;94;69;70;64;54;57;52;31
;73;54;84;47;47;44;48;58
;69;51;67;64;49;23;39;48
;64;87;72;67;48;48;41;46
;59;63;61;69;27;42;49;29
;74;65;67;63;48;53;54;47

DemandaNPeriodos_it_ro;22

;60;71;9;57;47;53;47;33
;64;75;42;56;40;15;43;26
;76;64;87;49;60;51;41;37
;87;60;83;53;46;59;40;35
;75;86;54;46;48;41;22;27
;81;66;41;59;40;0;51;26
;58;54;67;57;36;50;40;28
;83;72;80;48;42;50;35;30
;83;107;58;47;58;55;33;62
;90;86;65;56;40;54;35;36

DemandaNPeriodos_it_ro;23

;70;53;55;51;55;32;37;27
;95;72;37;39;53;45;32;32
;80;54;56;55;41;36;42;39
;69;52;65;45;36;46;29;33
;58;54;50;53;53;38;37;29
;57;62;61;50;48;46;35;40
;58;63;55;5;25;40;38;27
;75;66;56;49;37;47;35;31
;68;66;53;45;59;39;36;38
;79;73;60;43;33;42;28;29

DemandaNPeriodos_it_ro;24

;61;73;56;38;45;32;29;28
;74;53;49;49;33;29;36;28
;107;38;38;50;41;46;32;32
;64;76;50;44;47;37;40;23
;56;51;60;44;40;40;31;27
;64;58;41;32;49;34;38;25

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

;46;52;52;37;40;38;31;22
;46;46;54;54;32;25;29;26
;58;61;46;52;34;30;42;33
;40;69;52;46;40;27;30;33

DemadaNPeriodos_it_ro;25

;53;43;47;39;26;33;28;25
;47;36;52;27;33;29;27;16
;51;45;41;40;35;35;28;17
;63;42;42;39;20;31;21;17
;52;38;35;41;37;25;25;30
;80;40;39;43;32;60;28;19
;41;44;46;48;47;36;24;25
;96;51;51;45;0;39;34;20
;65;27;63;36;38;43;29;14
;52;46;22;48;33;40;30;20

DemadaNPeriodos_it_ro;26

;42;41;42;28;24;29;26;18
;36;45;41;35;31;34;17;16
;50;29;46;33;36;33;17;17
;47;46;43;40;42;50;22;16
;57;43;35;35;29;28;30;27
;37;38;45;104;30;37;20;21
;45;48;47;35;37;25;24;22
;40;51;37;34;37;24;26;25
;50;55;39;36;36;55;17;17
;50;54;33;32;37;28;18;25

DemadaNPeriodos_it_ro;27

;55;42;35;36;24;24;24;18
;53;35;36;33;19;7;15;13
;38;38;67;29;36;12;18;8
;48;41;32;37;20;20;14;13
;43;34;31;25;33;31;20;18
;46;46;29;35;56;20;18;12
;45;37;40;36;30;26;26;24
;53;42;34;31;29;25;14;11
;20;38;38;17;24;18;15;9
;43;34;37;38;26;21;0;21

DemadaNPeriodos_it_ro;28

;34;32;29;26;25;15;20;14
;76;70;29;27;19;15;14;9
;52;33;31;24;20;24;18;10
;40;26;30;16;25;17;9;9
;31;38;13;34;30;17;17;9
;42;37;39;14;20;19;11;8
;38;43;27;23;22;22;21;8
;29;35;35;29;24;20;12;13
;32;34;41;13;17;14;12;13
;38;32;33;35;24;23;18;16

DemadaNPeriodos_it_ro;29

;28;30;29;17;18;15;14;16
;32;28;28;17;14;12;11;11
;30;40;21;25;26;21;8;18
;31;35;24;11;12;14;12;15
;42;27;37;34;23;22;8;10
;33;32;0;20;18;12;8;8
;45;35;29;27;1;21;9;16
;35;32;25;25;20;15;9;15
;43;42;31;16;13;13;11;13
;36;40;32;21;19;1;16;11

DemadaNPeriodos_it_ro;30

;24;27;24;23;19;18;17;12
;21;30;18;18;15;10;11;16
;34;23;17;25;27;10;17;13

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

;22;20;20;17;13;8;16;6
;30;33;37;12;17;8;12;13
;31;36;21;21;12;8;9;7
;37;21;29;11;24;16;17;10
;38;21;22;21;12;11;13;0
;35;12;25;12;14;11;13;31
;32;27;28;24;20;17;9;1

DemadaNPeriodos_it_ro;31

;28;21;18;8;15;13;9;18
;21;16;15;10;8;12;12;12
;25;20;23;22;6;15;14;10
;23;21;17;10;12;17;7;16
;30;21;14;16;10;10;14;11
;30;20;21;12;8;8;15;16
;19;15;25;15;10;13;12;19
;19;21;24;10;11;15;8;14
;31;21;13;11;11;13;18;19
;32;29;20;21;13;7;18;9

DemadaNPeriodos_it_ro;32

;17;22;17;20;24;8;18;7
;22;15;10;9;15;11;11;10
;15;19;19;9;16;18;15;15
;20;17;11;10;7;6;16;17
;23;28;21;7;9;10;10;8
;18;23;12;11;9;19;21;13
;20;20;22;13;16;13;7;13
;21;33;15;10;14;7;13;12
;18;14;15;11;14;16;13;9
;26;21;23;16;9;19;8;7

DemadaNPeriodos_it_ro;33

;19;25;18;15;9;16;10;12
;16;13;16;11;18;10;10;13
;23;27;10;14;14;10;18;16
;19;13;8;11;7;21;16;19
;25;18;11;6;11;10;14;13
;21;12;7;9;17;17;13;17
;26;18;9;17;11;15;12;17
;24;13;12;11;10;6;12;15
;15;13;11;18;17;17;18;10
;21;20;9;10;15;9;8;20

DemadaNPeriodos_it_ro;34

;16;14;15;10;14;12;12;17
;13;14;10;18;10;9;11;21
;30;8;19;18;13;22;17;13
;12;10;15;7;18;18;20;14
;19;10;6;18;13;14;19;18
;12;10;10;16;14;14;15;16
;21;10;16;12;16;11;12;21
;13;12;15;9;13;12;16;13
;13;10;13;11;13;10;19;11
;21;8;8;8;6;9;19;16

DemadaNPeriodos_it_ro;35

;13;18;7;8;11;13;13;14
;11;9;13;9;8;14;17;28
;10;21;14;11;21;19;12;21
;9;11;7;15;17;16;12;18
;8;8;17;12;16;16;17;21
;10;8;17;28;11;8;20;16
;11;16;11;5;8;19;19;18
;10;14;8;10;13;17;12;22
;13;16;18;13;12;20;10;15
;12;9;14;7;10;20;17;23

DemadaNPeriodos_it_ro;36

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

;17;8;13;10;9;16;20;28
;11;14;8;9;11;19;20;29
;14;18;13;13;17;14;26;24
;17;7;19;19;19;14;25;24
;8;22;11;15;18;13;19;21
;8;17;17;11;19;22;12;21
;17;12;17;19;18;26;13;35
;13;7;13;13;18;17;10;22
;12;18;6;9;11;12;18;23
;7;32;7;11;22;20;21;22

DemadaNPeriodos_it_ro;37

;7;14;8;9;15;22;29;30
;16;11;7;17;18;22;29;32
;15;9;18;17;17;25;49;67
;8;15;23;17;12;28;22;26
;16;8;16;22;14;21;20;25
;17;21;9;20;24;19;26;23
;9;15;15;13;23;22;35;34
;10;13;11;18;10;23;17;25
;7;11;9;17;12;7;31;26
;16;7;5;16;21;23;25;32

DemadaNPeriodos_it_ro;38

;17;8;11;12;19;24;30;30
;14;10;12;20;22;28;30;30
;12;26;16;5;20;29;0;33
;17;17;15;12;14;25;26;41
;10;14;17;18;22;19;28;30
;23;13;5;16;18;25;30;33
;18;13;18;19;16;28;30;28
;12;11;15;12;13;25;29;45
;0;10;13;11;12;25;27;26
;7;9;22;20;23;22;38;31

DemadaNPeriodos_it_ro;39

;10;11;17;6;15;33;36;40
;9;15;16;22;17;34;29;35
;15;20;15;24;34;33;33;51
;15;18;12;21;30;24;30;35
;15;17;19;23;27;28;39;41
;12;19;26;18;20;31;37;32
;16;16;21;17;31;47;35;47
;14;22;15;17;25;27;34;52
;10;20;12;15;31;25;33;43
;10;21;20;24;24;28;31;47

DemadaNPeriodos_it_ro;40

;10;15;21;4;39;37;52;51
;14;25;16;36;27;31;38;53
;18;13;21;32;31;34;47;39
;19;11;26;27;29;36;23;51
;18;22;23;25;23;0;33;51
;19;20;19;26;34;24;32;42
;18;20;16;31;35;29;45;34
;18;10;17;23;27;41;36;45
;19;12;15;22;90;30;42;43
;17;17;22;26;33;31;39;44

DemadaNPeriodos_it_ro;41

;15;16;31;35;39;34;37;44
;19;38;27;32;0;54;27;53
;13;22;38;33;30;39;27;39
;14;26;0;28;32;38;57;44
;16;17;23;23;28;30;34;50
;16;19;22;34;35;34;40;57
;20;18;30;33;21;44;41;49
;12;15;22;26;44;37;40;43

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

;10;18;24;23;26;49;47;47
;19;25;19;38;36;45;50;57

DemandaNPeriodos_it_ro;42
;18;35;27;23;35;40;50;53
;17;31;32;23;44;37;49;65
;32;36;33;34;40;39;42;59
;24;27;28;45;39;51;49;42
;18;29;32;32;42;27;35;53
;16;16;36;37;37;41;83;105
;12;26;23;24;45;63;46;71
;14;23;25;50;36;53;45;59
;14;24;36;37;39;41;58;57
;21;28;30;29;32;50;41;41

DemandaNPeriodos_it_ro;43
;28;29;24;41;0;51;63;67
;28;33;23;40;49;38;66;61
;27;36;16;32;52;60;47;58
;28;34;34;32;60;50;81;46
;19;25;39;34;42;48;47;56
;24;44;26;37;40;50;59;75
;25;36;29;6;38;53;67;66
;25;22;35;29;41;41;40;64
;18;30;36;39;53;105;55;54
;26;36;37;28;26;49;55;54

DemandaNPeriodos_it_ro;44
;32;29;37;43;19;50;54;59
;28;24;59;36;54;52;64;72
;37;23;35;41;65;52;59;77
;35;38;43;57;28;60;55;46
;28;39;35;47;38;48;64;70
;34;33;34;41;45;46;85;64
;35;34;34;39;37;61;97;72
;21;41;39;42;43;66;51;80
;33;28;52;55;61;71;71;67
;35;33;42;37;48;19;68;81

DemandaNPeriodos_it_ro;45
;40;9;56;56;54;60;51;63
;31;34;34;36;62;49;58;78
;29;40;41;63;38;58;68;73
;42;38;52;57;60;65;70;77
;38;42;43;46;60;53;60;76
;37;37;48;59;55;58;82;49
;38;32;38;43;61;61;72;86
;41;55;40;47;39;80;64;90
;35;42;43;54;58;75;44;72
;27;38;44;42;48;43;1;115

DemandaNPeriodos_it_ro;46
;47;41;43;48;65;81;73;84
;47;51;56;57;60;59;8;93
;47;10;67;40;81;24;66;90
;34;45;46;69;67;53;91;95
;23;60;55;53;58;73;76;102
;33;47;45;45;55;62;74;82
;39;68;48;62;59;80;67;171
;36;39;42;63;50;78;65;200
;41;71;53;63;64;67;84;66
;52;40;48;54;57;92;83;81

DemandaNPeriodos_it_ro;47
;51;52;41;54;83;87;101;92
;41;48;61;76;70;77;60;136
;68;48;58;68;68;82;87;92
;52;69;59;59;82;91;72;0
;43;40;53;76;88;74;86;62

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

;28;54;35;56;64;73;68;195
;36;44;39;63;67;65;87;117
;45;49;50;43;68;85;92;106
;46;46;66;83;74;96;77;67
;57;48;51;64;77;81;6;116

DemadaNPeriodos_it_ro;48
;53;65;78;80;88;63;96;83
;46;52;61;55;76;76;91;87
;58;42;67;68;81;91;68;91
;120;59;74;78;75;93;78;90
;48;56;61;70;58;75;98;0
;57;20;94;64;67;74;65;85
;45;60;56;77;84;83;93;123
;46;60;71;55;67;87;102;106
;61;41;63;71;79;65;83;80
;34;40;61;69;90;78;77;96

DemadaNPeriodos_it_ro;49
;43;64;83;83;64;91;92;134
;23;53;59;80;93;69;94;139
;54;142;69;75;88;76;53;78
;54;39;83;86;86;125;82;104
;37;76;61;81;64;87;88;100
;48;69;80;80;62;86;76;62
;63;69;83;59;80;79;93;126
;69;44;55;62;81;104;104;79
;30;81;91;88;84;96;90;101
;49;68;80;76;100;83;74;91

DemadaNPeriodos_it_ro;50
;69;94;69;77;68;103;114;123
;63;60;75;66;105;98;90;111
;24;70;39;77;78;120;80;112
;65;79;76;58;118;70;92;102
;68;56;78;81;91;101;113;19
;66;67;75;83;74;68;87;91
;59;44;85;68;110;104;109;110
;62;67;70;98;81;110;95;92
;31;59;90;70;86;105;89;108
;72;62;73;80;81;86;106;125

DemadaNPeriodos_it_ro;51
;129;79;76;26;64;112;115;104
;73;69;82;100;85;90;70;99
;74;63;68;71;89;105;120;105
;64;77;99;97;77;110;113;226
;58;90;73;82;135;105;124;106
;76;81;94;106;67;90;120;133
;69;83;88;59;124;93;70;101
;77;61;80;78;98;112;112;98
;91;107;65;91;105;104;107;123
;73;80;85;42;117;111;86;123

DemadaNPeriodos_it_ro;52
;86;77;105;77;106;121;128;143
;76;85;101;104;109;105;81;87
;74;68;75;84;98;111;11;111
;70;88;93;92;107;97;151;150
;67;76;100;145;108;92;121;97
;72;52;97;127;91;94;107;79
;57;85;74;94;102;111;140;121
;82;76;86;113;88;103;114;113
;76;79;108;99;105;106;112;102
;79;140;72;81;110;101;106;112

DemadaNPeriodos_it_ro;53
;67;201;92;91;117;100;125;116
;66;107;101;98;117;94;116;105

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

;71;88;103;122;120;97;113;91
;73;146;91;115;107;100;102;120
;71;104;89;64;114;0;127;107
;69;81;83;77;104;117;25;99
;45;79;164;99;121;96;148;118
;96;91;83;115;95;126;108;113
;89;59;95;118;105;133;118;69
;99;74;84;114;122;130;128;102

DemadaNPeriodos_it_ro;54
;64;93;90;96;103;119;113;136
;47;86;99;108;69;125;116;120
;106;91;113;102;97;130;123;104
;108;109;133;90;105;100;118;146
;83;84;92;107;97;84;108;125
;77;81;100;107;104;109;52;135
;70;105;99;115;95;237;106;102
;101;100;111;92;66;13;127;109
;61;124;111;106;109;107;119;114
;97;81;86;113;128;122;101;146

DemadaNPeriodos_it_ro;55
;95;90;227;117;140;66;161;123
;112;76;81;173;117;115;123;131
;120;92;113;118;124;119;105;134
;80;104;105;99;133;103;124;86
;100;92;85;121;124;125;121;133
;80;65;106;101;78;104;165;118
;114;132;69;96;124;111;114;115
;110;96;121;102;127;101;108;120
;88;74;123;115;118;119;136;108
;156;103;108;129;186;111;151;110

DemadaNPeriodos_it_ro;56
;119;92;347;100;104;78;92;77
;100;109;104;90;105;127;113;135
;73;112;130;80;167;104;102;150
;110;90;90;108;92;144;103;149
;78;84;144;55;128;135;103;114
;103;93;127;119;142;113;118;138
;105;33;67;114;111;122;114;123
;92;113;101;124;0;109;123;78
;102;102;147;142;124;136;92;91
;92;96;110;98;96;146;102;135

DemadaNPeriodos_it_ro;57
;98;95;115;120;112;110;107;150
;111;94;119;108;110;147;106;148
;100;94;101;96;126;133;112;119
;92;114;120;109;103;123;96;121
;100;87;91;126;69;112;123;138
;79;119;96;122;129;133;116;180
;112;122;117;131;113;118;139;129
;112;119;103;120;143;145;109;122
;98;124;138;136;137;113;113;137
;91;100;106;76;117;118;127;97

DemadaNPeriodos_it_ro;58
;162;132;145;76;98;112;125;132
;120;108;135;90;116;111;128;134
;90;116;95;104;116;125;115;105
;152;104;139;105;123;146;176;38
;127;125;117;96;0;105;143;144
;47;112;154;121;115;98;135;87
;129;123;127;100;141;90;104;143
;126;128;120;166;112;113;105;115
;52;109;126;123;66;131;136;96
;131;123;93;135;103;86;94;136

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

DemandaNPeriodos_it_ro;59

;51;129;105;152;99;111;131;157
;101;136;136;134;117;122;105;137
;98;102;105;106;143;117;104;117
;113;126;139;105;128;106;131;108
;122;129;261;129;106;165;158;77
;114;118;110;142;39;56;53;112
;88;157;134;48;137;108;124;146
;134;106;127;128;146;137;130;108
;110;115;101;134;108;113;125;132
;100;103;101;195;134;157;117;137

DemandaNPeriodos_it_ro;60

;108;114;113;0;115;132;163;135
;99;108;112;134;200;188;120;107
;112;138;133;136;139;96;108;111
;155;146;130;152;170;105;80;141
;113;127;141;135;140;113;177;140
;126;105;114;112;153;133;112;110
;103;126;120;117;150;124;131;113
;139;45;138;81;114;141;152;28
;152;133;127;112;107;117;106;43
;90;151;146;120;109;124;122;149

DemandaNPeriodos_it_ro;61

;128;125;160;144;152;122;46;75
;137;150;96;115;116;141;84;94
;87;145;125;142;114;113;126;104
;99;150;126;123;108;142;149;141
;114;122;120;149;139;129;131;143
;109;117;85;141;135;186;114;89
;122;119;126;143;111;106;139;124
;109;128;148;110;114;138;129;96
;138;147;124;129;116;142;112;193
;116;118;108;118;111;127;117;107

DemandaNPeriodos_it_ro;62

;120;126;100;150;98;155;141;120
;115;114;137;118;115;105;102;110
;132;87;118;138;116;81;126;130
;120;164;109;121;147;91;135;126
;127;133;114;110;112;134;107;136
;145;101;171;131;123;110;106;107
;107;145;181;106;148;111;114;120
;124;115;121;110;109;134;136;135
;104;118;121;122;112;84;177;119
;138;109;121;136;100;136;108;132

DemandaNPeriodos_it_ro;63

;124;120;148;129;108;104;119;83
;145;131;111;114;111;183;122;74
;113;119;118;134;128;121;107;123
;170;154;141;112;139;141;109;160
;84;135;127;152;111;111;103;119
;109;137;112;137;133;97;115;108
;138;135;111;103;132;114;110;107
;109;216;129;163;132;140;121;151
;128;136;123;138;117;124;133;119
;110;133;117;111;112;150;136;131

Stock inicial X0,i;

;106;105;101;113;111;104;108;102;97;111;126;126;126;126;120;120;120;120;113;113;113;113;123;123;123;123;121;121;121;121;116;116;116;116;
118;118;118;118;112;112;112;112;115;115;115;115;124;124;124;124

Coste de almacenamiento H_t_i;

;2,25;2,166;2,084;1,999;1,917;1,833;1,751;1,666;1,584;1,5;0,225;0,225;0,225;0,225;0,217;0,217;0,217;0,217;0,208;0,208;0,208;0,208;0,2;0,2;0,2;0,2
;0,192;0,192;0,192;0,192;0,183;0,183;0,183;0,183;0,175;0,175;0,175;0,175;0,167;0,167;0,167;0,167;0,158;0,158;0,158;0,158;0,15;0,15;0,15;0,15

ANEXO 3: Tablas comparativas de los costes total y los niveles de servicio, en los 52 periodos de análisis, de las distintas propuestas de planificación

A continuación se presentan los resultados obtenidos con el medible de los costes totales y el nivel de servicio en los 52 periodos de análisis en las Tabla 0-1 y Tabla 0-2.

Tabla 0-1: Comparativa de los costes totales en los 52 periodos

Instancia	TCR_52_Decoordi nated	TCR_52_Centra lized	TCR52_Coor_ dist	TCR52_Coor_dist _OP1	TCR52_Coor_dist _OP2
STP1R00 _1	7.031.686	7.006.685	6.986.858	6.787.983	6.973.251
STP1R00 _2	8.321.149	8.019.834	7.080.683	7.937.493	7.606.396
STP1R00 _3	6.905.001	7.317.040	7.417.667	7.363.695	7.481.707
STP1R00 _4	6.834.514	7.012.406	6.974.912	6.931.934	6.996.965
STP1R00 _5	8.864.497	9.096.974	9.141.836	9.047.717	9.476.895
STP1R00 _6	6.477.510	6.843.160	6.652.235	6.215.763	6.519.198
STP1R00 _7	8.473.687	9.089.200	9.076.550	9.573.479	9.089.200
STP1R00 _8	6.749.519	6.376.245	6.284.608	6.566.428	6.356.626
STP1R00 _9	8.862.071	9.327.638	9.250.295	9.425.517	9.250.961
STP1R00 _10	6.467.916	6.328.180	6.058.264	6.345.696	6.200.182
STP1R00 _11	6.805.546	7.325.679	7.325.679	7.291.282	7.325.679
STP1R00 _12	8.269.221	7.970.996	7.945.311	7.995.859	7.946.569
STP1R30 _1	61.753.291	61.547.017	60.931.933	61.049.193	62.840.475
STP1R30 _2	58.740.527	58.974.671	58.849.269	60.232.511	60.521.023
STP1R30 _3	57.053.873	56.589.925	53.898.672	55.189.299	53.582.074
STP1R30 _4	60.765.327	60.939.399	61.762.080	65.382.381	64.443.434
STP1R30 _5	63.340.461	62.325.850	63.650.293	60.786.589	62.082.798
STP1R30 _6	63.537.443	59.147.473	60.699.475	60.995.158	60.627.663
STP1R30 _7	55.560.156	59.742.386	54.111.032	53.536.373	55.779.655
STP1R30 _8	59.525.132	57.042.072	58.453.804	58.944.956	59.568.371

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

STP1R30 _9	62.011.174	60.153.794	62.375.285	61.956.011	59.762.941
STP1R30 _10	58.461.608	58.370.727	60.435.238	61.128.004	58.589.858
STP1R30 _11	61.957.038	62.025.051	63.320.512	62.427.504	59.785.643
STP1R30 _12	58.823.351	58.322.155	57.271.461	58.530.889	60.475.907
STP1R75 _1	7.082.301	6.982.247	6.543.104	6.340.347	6.507.270
STP1R75 _2	6.585.665	6.304.861	6.753.061	6.528.726	7.702.698
STP1R75 _3	6.822.767	7.511.346	7.400.550	8.254.551	7.423.716
STP1R75 _4	9.185.944	8.707.967	8.991.490	8.873.743	9.145.492
STP1R75 _5	6.679.916	7.493.654	7.531.685	7.402.222	7.438.274
STP1R75 _6	7.692.230	8.868.744	7.995.475	6.937.981	8.700.603
STP1R75 _7	7.355.212	7.834.366	7.776.941	7.731.857	7.758.489
STP1R75 _8	7.132.255	7.753.913	8.073.025	8.006.072	8.163.178
STP1R75 _9	7.553.182	8.142.910	7.777.146	7.485.943	7.785.286
STP1R75 _10	9.321.741	9.423.772	9.492.549	10.256.438	9.709.742
STP1R75 _11	7.171.157	8.137.383	7.633.549	6.590.582	6.944.467
STP1R75 _12	6.696.731	7.540.878	8.066.684	7.066.848	6.315.012
STP4R00 _1	17.509.484	17.173.996	16.747.222	17.246.057	16.617.248
STP4R00 _2	17.281.631	17.421.015	17.456.047	17.381.819	17.522.804
STP4R00 _3	17.134.840	18.632.983	18.848.491	17.282.764	17.486.479
STP4R00 _4	16.683.808	17.664.683	17.671.285	17.915.220	17.671.285
STP4R00 _5	18.010.180	17.601.423	17.678.713	17.701.679	17.678.713
STP4R00 _6	15.975.995	16.362.623	16.474.623	16.328.466	16.474.623
STP4R00 _7	18.589.535	18.945.301	18.711.110	18.873.794	18.936.401
STP4R00 _8	15.145.632	16.956.132	15.981.466	16.756.360	16.560.705
STP4R00 _9	16.881.662	17.223.942	17.168.016	16.850.159	16.988.884
STP4R00 _10	18.505.186	17.454.150	17.330.147	17.374.055	17.310.711

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

STP4R00 _11	17.470.680	18.018.024	18.364.378	18.323.853	17.742.469
STP4R00 _12	19.265.722	19.769.138	19.726.264	19.557.958	19.631.451
STP4R30 _1	70.957.736	70.063.791	69.651.044	70.769.802	69.713.388
STP4R30 _2	70.436.335	71.679.662	70.659.196	70.933.912	71.378.735
STP4R30 _3	67.324.306	69.298.332	69.280.139	69.647.947	68.178.647
STP4R30 _4	73.399.516	72.318.940	70.350.705	71.890.380	71.890.380
STP4R30 _5	70.749.484	71.034.596	69.786.534	72.602.416	72.602.416
STP4R30 _6	74.566.348	72.134.990	75.339.126	74.381.903	74.381.903
STP4R30 _7	70.623.773	72.267.657	72.568.684	70.365.650	71.101.424
STP4R30 _8	72.278.908	70.001.564	70.801.665	71.888.770	71.492.804
STP4R30 _9	64.797.376	65.369.895	62.817.578	62.717.910	64.444.610
STP4R30 _10	69.573.624	67.982.554	66.220.028	64.467.625	69.643.525
STP4R30 _11	65.199.740	64.151.386	65.873.448	65.806.846	63.894.827
STP4R30 _12	71.218.529	69.825.976	69.760.890	69.652.326	70.172.851
STP4R75 _1	18.694.746	18.828.024	17.253.544	16.637.005	17.217.032
STP4R75 _2	17.124.325	16.463.270	16.837.865	17.125.696	16.629.164
STP4R75 _3	16.211.695	17.061.209	16.454.788	16.983.813	17.126.225
STP4R75 _4	15.922.114	15.280.671	15.056.931	15.412.999	15.381.039
STP4R75 _5	16.455.502	15.498.581	16.277.441	15.640.020	15.379.341
STP4R75 _6	17.327.095	17.333.413	17.078.071	16.920.016	17.710.112
STP4R75 _7	25.384.764	24.938.247	25.621.174	24.838.856	24.784.931
STP4R75 _8	17.386.983	17.128.724	17.644.707	17.565.148	16.829.130
STP4R75 _9	17.889.620	17.053.255	17.656.782	17.508.396	17.195.741
STP4R75 _10	16.669.545	16.068.988	16.009.309	16.719.390	16.752.650
STP4R75 _11	16.221.923	16.534.339	17.202.237	16.345.269	16.960.063
STP4R75 _12	18.186.431	18.414.680	18.593.063	18.238.298	18.088.931

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

STP5R00 _1	25.869.063	24.625.728	25.004.211	25.004.211	25.004.211
STP5R00 _2	25.559.081	25.002.291	25.309.589	25.309.589	25.309.589
STP5R00 _3	25.823.208	25.690.931	25.606.878	25.606.878	25.606.878
STP5R00 _4	27.905.800	28.067.246	28.088.475	28.002.174	28.002.174
STP5R00 _5	24.981.801	24.715.583	24.715.583	24.715.583	24.715.583
STP5R00 _6	25.648.768	25.947.091	25.766.380	25.809.215	25.809.215
STP5R00 _7	23.381.810	23.252.629	23.432.197	23.252.055	23.252.055
STP5R00 _8	25.848.316	26.337.756	26.489.830	25.800.814	25.800.814
STP5R00 _9	23.769.282	25.375.165	24.445.891	24.445.891	24.445.891
STP5R00 _10	37.731.177	50.374.132	35.780.084	36.108.417	36.108.417
STP5R00 _11	24.630.115	28.114.104	24.883.670	24.901.477	24.901.477
STP5R00 _12	27.267.623	28.423.403	27.396.328	27.395.907	27.395.907
STP5R30 _1	76.167.905	71.883.855	75.071.460	72.690.659	72.690.659
STP5R30 _2	76.215.218	77.147.931	78.178.941	77.503.920	77.503.920
STP5R30 _3	78.790.045	79.397.720	77.237.969	74.849.525	74.849.525
STP5R30 _4	76.796.133	77.057.587	75.441.069	77.174.070	77.174.070
STP5R30 _5	73.214.295	73.385.037	75.498.609	75.312.866	75.312.866
STP5R30 _6	69.277.404	67.618.069	70.286.625	70.928.132	70.928.132
STP5R30 _7	72.591.197	71.683.265	71.889.979	72.688.167	72.688.167
STP5R30 _8	81.412.325	79.608.092	81.311.022	79.850.404	79.850.404
STP5R30 _9	73.629.597	72.355.551	72.094.165	72.237.622	72.237.622
STP5R30 _10	77.592.002	75.768.027	76.139.074	75.354.707	75.354.707
STP5R30 _11	75.962.452	75.028.991	76.884.710	75.706.121	75.706.121
STP5R30 _12	76.650.542	74.282.625	77.490.401	76.396.556	76.396.556
STP5R75 _1	22.919.303	22.751.573	22.511.362	22.492.931	22.492.931
STP5R75 _2	26.239.299	26.748.896	27.070.212	27.070.779	27.070.779

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

STP5R75 _3	32.949.042	30.641.349	31.054.778	31.055.031	31.055.031
STP5R75 _4	23.169.208	24.173.434	23.636.868	23.694.379	23.694.379
STP5R75 _5	26.290.857	23.872.681	23.817.106	24.007.458	24.007.458
STP5R75 _6	26.541.857	26.587.321	26.137.755	25.722.887	25.722.887
STP5R75 _7	29.867.679	28.773.362	29.643.509	28.304.050	28.304.050
STP5R75 _8	26.334.568	27.375.448	25.897.756	27.103.152	27.103.152
STP5R75 _9	22.949.430	22.770.207	23.807.061	23.391.023	23.391.023
STP5R75 _10	23.621.503	23.721.099	24.135.510	23.525.619	23.525.619
STP5R75 _11	28.346.186	27.475.658	28.431.363	28.316.202	28.316.202
STP5R75 _12	25.238.220	25.246.340	26.091.112	25.784.577	25.784.577
STP6R00 _1	10.398.015	10.145.436	10.727.049	10.727.049	10.727.049
STP6R00 _2	9.224.088	9.408.213	9.612.128	9.612.128	9.612.128
STP6R00 _3	9.400.240	9.137.243	9.721.412	9.721.412	9.721.412
STP6R00 _4	10.154.725	11.126.863	10.553.123	10.553.123	10.553.123
STP6R00 _5	10.815.277	11.090.352	10.889.953	10.889.953	10.889.953
STP6R00 _6	9.385.165	10.461.598	9.876.267	9.876.267	9.876.267
STP6R00 _7	12.175.289	12.824.796	11.024.917	11.024.917	11.024.917
STP6R00 _8	12.426.653	13.382.731	12.328.914	12.328.914	12.328.914
STP6R00 _9	8.265.891	8.562.413	8.562.413	8.562.413	8.562.413
STP6R00 _10	10.677.607	10.473.632	10.451.868	10.451.868	10.451.868
STP6R00 _11	12.303.917	11.355.145	11.956.346	11.956.346	11.956.346
STP6R00 _12	10.127.335	10.606.870	10.577.122	10.577.122	10.577.122
STP6R30 _1	10.436.772	10.372.281	-	-	-
STP6R30 _2	15.780.348	16.677.409	-	-	-
STP6R30 _3	13.067.796	11.440.440	-	-	-
STP6R30 _4	12.969.000	12.848.336	-	-	-

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

STP6R30 _5	13.711.852	12.370.926	-	-	-
STP6R30 _6	10.931.813	11.140.827	-	-	-
STP6R30 _7	11.784.167	12.675.349	-	-	-
STP6R30 _8	11.820.236	10.992.359	-	-	-
STP6R30 _9	11.465.191	12.501.445	-	-	-
STP6R30 _10	11.478.322	11.396.898	-	-	-
STP6R30 _11	11.382.546	12.596.706	-	-	-
STP6R30 _12	13.671.769	11.355.746	-	-	-
STP6R75 _1	10.635.507	10.454.712	9.953.305	9.953.305	9.953.305
STP6R75 _2	11.691.009	11.603.802	10.238.711	10.238.711	10.238.711
STP6R75 _3	13.239.662	13.730.932	11.950.575	11.950.575	11.950.575
STP6R75 _4	10.239.320	10.252.908	10.093.770	10.093.770	10.093.770
STP6R75 _5	10.773.104	10.907.523	11.004.270	11.004.270	11.004.270
STP6R75 _6	10.565.469	10.491.465	10.697.543	10.697.543	10.697.543
STP6R75 _7	11.976.772	11.316.446	11.700.203	11.700.203	11.700.203
STP6R75 _8	9.847.486	11.006.153	10.356.185	10.356.185	10.356.185
STP6R75 _9	10.665.101	10.985.213	11.230.187	11.230.187	11.230.187
STP6R75 _10	9.918.448	10.516.302	10.711.079	10.711.079	10.711.079
STP6R75 _11	9.504.746	9.507.227	9.974.044	9.974.044	9.974.044
STP6R75 _12	10.924.711	10.680.828	11.459.605	11.459.605	11.459.605
TTP1R00 _1	8.344.421	8.003.511	8.168.470	8.168.470	8.168.470
TTP1R00 _2	6.634.791	6.764.416	6.547.368	6.547.368	6.547.368
TTP1R00 _3	6.476.835	6.650.989	6.636.225	6.636.225	6.636.225
TTP1R00 _4	6.866.972	6.893.731	6.903.970	6.813.613	6.903.970
TTP1R00 _5	7.346.970	7.614.851	7.391.564	7.391.564	7.391.564
TTP1R00 _6	7.906.139	7.890.336	7.877.941	7.877.941	7.877.941

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

TTP1R00_7	7.040.614	7.130.148	7.130.148	7.116.776	7.116.776
TTP1R00_8	7.247.064	7.024.676	7.232.757	7.232.757	7.232.757
TTP1R00_9	6.376.019	6.499.478	6.499.520	6.499.516	6.499.516
TTP1R00_10	8.190.268	7.727.936	7.495.204	7.495.204	7.495.204
TTP1R00_11	7.048.912	6.835.038	7.075.567	6.850.072	6.850.072
TTP1R00_12	7.657.377	7.623.742	7.604.453	7.604.453	7.604.453
TTP1R30_1	11.970.659	12.656.578	13.793.521	14.558.589	14.281.555
TTP1R30_2	15.614.759	12.034.717	13.549.877	15.339.167	14.009.201
TTP1R30_3	16.643.411	10.570.493	12.779.326	12.082.295	11.712.627
TTP1R30_4	15.974.440	15.242.524	14.080.282	13.741.688	14.207.075
TTP1R30_5	14.693.572	12.457.054	14.594.442	14.646.391	13.060.178
TTP1R30_6	19.397.306	13.855.906	18.114.734	15.766.153	15.386.766
TTP1R30_7	16.300.811	13.566.321	18.807.515	15.518.935	13.370.290
TTP1R30_8	16.886.763	14.753.529	15.786.291	13.636.484	16.482.295
TTP1R30_9	17.447.168	13.210.546	17.288.009	18.477.046	18.450.101
TTP1R30_10	24.686.931	17.817.401	17.507.373	21.013.666	21.208.107
TTP1R30_11	17.168.510	15.485.988	14.987.087	17.010.517	18.065.070
TTP1R30_12	14.732.781	12.465.439	15.848.501	13.119.302	14.578.171
TTP1R75_1	7.481.627	7.429.469	7.372.248	7.372.248	7.372.248
TTP1R75_2	8.375.050	8.796.443	8.536.264	8.536.264	8.536.264
TTP1R75_3	9.095.489	9.131.665	9.131.665	9.131.665	9.131.665
TTP1R75_4	7.477.463	7.600.021	7.943.285	7.943.285	7.943.285
TTP1R75_5	6.217.710	6.167.683	6.366.978	6.366.978	6.366.978
TTP1R75_6	7.160.868	6.786.234	6.913.371	6.913.371	6.913.371
TTP1R75_7	10.010.898	10.257.552	10.143.738	10.143.738	10.179.085
TTP1R75_8	6.860.119	7.238.396	7.272.557	7.289.066	7.289.066

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

TTP1R75 _9	7.854.951	8.900.495	8.907.279	8.907.412	8.907.412
TTP1R75 _10	6.908.171	6.888.022	6.888.022	7.039.977	6.888.022
TTP1R75 _11	5.999.165	7.017.646	7.017.646	7.017.646	7.017.646
TTP1R75 _12	10.216.819	10.677.236	10.677.236	10.677.236	10.677.236
TTP4R00 _1	18.288.361	18.103.735	18.288.378	18.288.378	18.288.378
TTP4R00 _2	18.888.569	18.827.490	18.888.569	18.888.569	18.888.569
TTP4R00 _3	17.706.667	17.883.204	17.825.045	17.825.045	17.825.045
TTP4R00 _4	17.971.710	17.951.681	17.742.045	17.742.045	17.742.045
TTP4R00 _5	16.783.826	16.669.873	16.783.826	16.783.826	16.783.826
TTP4R00 _6	17.384.453	17.699.630	17.421.404	17.421.404	17.421.404
TTP4R00 _7	18.980.188	18.980.198	18.980.188	18.980.188	18.980.188
TTP4R00 _8	16.733.195	16.741.310	16.733.195	16.733.195	16.733.195
TTP4R00 _9	17.454.432	17.457.764	17.393.877	17.393.877	17.393.877
TTP4R00 _10	17.863.242	17.863.242	17.863.242	17.863.242	17.863.242
TTP4R00 _11	16.013.291	16.337.052	16.357.434	16.357.434	16.357.434
TTP4R00 _12	15.983.693	16.173.289	16.090.323	16.090.323	16.090.323
TTP4R30 _1	30.634.944	27.163.574	29.095.398	28.800.544	28.742.981
TTP4R30 _2	25.191.213	26.260.183	25.271.405	25.025.064	25.163.260
TTP4R30 _3	29.992.798	26.046.980	27.840.014	28.911.349	30.069.766
TTP4R30 _4	28.526.775	26.668.891	30.250.204	28.648.711	27.441.222
TTP4R30 _5	29.564.320	26.807.083	25.533.681	27.783.171	27.219.504
TTP4R30 _6	32.571.963	28.432.064	29.144.219	28.132.783	29.749.294
TTP4R30 _7	26.064.258	24.227.938	27.122.206	27.122.206	26.305.396
TTP4R30 _8	28.111.377	25.634.821	25.398.209	25.398.209	23.425.312
TTP4R30 _9	26.239.943	24.142.110	25.702.060	25.702.060	26.132.074
TTP4R30 _10	27.702.294	24.455.724	25.425.418	25.606.293	25.795.315

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

TTP4R30 _11	26.543.382	24.569.647	26.852.459	27.827.025	25.552.807
TTP4R30 _12	30.662.187	26.348.001	28.989.968	26.242.969	27.259.371
TTP4R75 _1	17.439.324	16.890.485	16.905.844	16.990.013	16.990.013
TTP4R75 _2	18.013.391	18.397.016	18.335.006	18.335.006	18.335.006
TTP4R75 _3	17.002.568	17.337.475	17.221.669	17.277.706	17.277.706
TTP4R75 _4	15.416.153	15.131.293	15.131.052	15.131.052	15.131.052
TTP4R75 _5	18.112.658	17.923.700	17.809.414	17.809.414	17.872.981
TTP4R75 _6	21.629.779	21.611.371	21.626.483	21.626.483	21.626.483
TTP4R75 _7	18.337.494	18.199.647	18.207.640	18.150.193	18.207.640
TTP4R75 _8	16.342.724	16.990.121	16.772.745	16.772.745	16.772.745
TTP4R75 _9	16.545.336	16.155.114	16.218.283	16.218.283	16.218.283
TTP4R75 _10	18.396.699	18.380.350	19.329.329	18.366.713	19.329.329
TTP4R75 _11	19.356.495	19.396.622	19.655.368	19.550.663	19.655.368
TTP4R75 _12	19.052.604	19.377.894	19.181.018	19.238.881	19.174.858
TTP5R00 _1	25.640.466	25.652.292	25.640.466	25.640.466	25.640.466
TTP5R00 _2	23.733.936	23.624.754	23.619.300	23.619.300	23.619.300
TTP5R00 _3	25.877.672	25.877.481	25.877.481	25.877.481	25.877.481
TTP5R00 _4	26.674.890	27.403.405	26.667.491	26.667.491	26.667.491
TTP5R00 _5	27.078.205	27.185.681	27.158.878	27.158.878	27.158.878
TTP5R00 _6	25.986.674	26.128.719	26.131.428	26.131.428	26.131.428
TTP5R00 _7	26.010.963	25.801.242	25.793.910	25.793.910	25.793.910
TTP5R00 _8	24.980.332	25.670.694	25.670.694	25.670.694	25.670.694
TTP5R00 _9	26.235.415	25.974.863	25.974.863	25.974.863	25.974.863
TTP5R00 _10	34.236.325	46.106.855	46.865.655	46.837.053	46.837.053
TTP5R00 _11	24.885.467	25.024.753	24.509.491	24.523.957	24.523.957
TTP5R00 _12	22.985.125	24.053.005	23.647.181	23.661.316	23.661.316

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

TTP5R30 _1	36.439.581	31.975.515	31.110.071	33.710.692	33.710.692
TTP5R30 _2	31.314.673	31.063.563	31.072.489	31.154.755	31.154.755
TTP5R30 _3	31.843.481	30.864.790	33.744.253	32.267.112	32.267.112
TTP5R30 _4	33.762.328	33.706.689	31.163.550	34.428.065	34.428.065
TTP5R30 _5	35.847.735	32.600.476	34.047.713	35.046.460	35.046.460
TTP5R30 _6	36.412.060	35.333.307	37.866.732	37.893.678	37.893.678
TTP5R30 _7	39.781.442	35.549.326	37.451.704	38.138.782	38.138.782
TTP5R30 _8	37.290.590	37.258.206	37.552.785	37.484.512	37.484.512
TTP5R30 _9	39.973.488	38.382.853	40.083.093	40.165.704	40.165.704
TTP5R30 _10	36.187.071	36.341.735	37.368.550	37.191.623	37.191.623
TTP5R30 _11	36.438.749	35.112.041	33.899.435	35.331.445	35.331.445
TTP5R30 _12	44.416.638	38.118.942	40.896.213	40.133.077	40.133.077
TTP5R75 _1	25.425.956	25.425.956	25.425.956	25.425.956	25.425.956
TTP5R75 _2	28.170.581	28.124.454	28.124.454	28.124.454	28.124.454
TTP5R75 _3	25.993.605	26.266.508	26.263.236	26.263.236	26.263.236
TTP5R75 _4	25.657.760	25.784.201	25.784.201	25.784.201	25.784.201
TTP5R75 _5	27.972.183	27.940.842	27.940.842	27.940.842	27.940.842
TTP5R75 _6	23.555.832	23.457.337	23.457.337	23.457.337	23.457.337
TTP5R75 _7	46.402.657	50.086.131	50.086.131	50.086.131	50.086.131
TTP5R75 _8	23.274.230	23.270.814	23.266.764	23.266.764	23.266.764
TTP5R75 _9	25.619.215	25.668.441	25.707.161	25.707.161	25.707.161
TTP5R75 _10	24.782.844	24.850.102	24.850.102	24.850.102	24.850.102
TTP5R75 _11	26.060.390	26.051.146	26.060.390	26.060.390	26.060.390
TTP5R75 _12	29.790.925	29.746.104	29.790.925	29.790.925	29.790.925
TTP6R00 _1	10.932.771	10.425.858	10.665.416	10.665.416	10.665.416
TTP6R00 _2	11.818.404	11.697.386	11.818.404	11.818.404	11.818.404

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

TTP6R00_3	10.905.221	10.843.244	10.889.656	10.889.656	10.889.656
TTP6R00_4	10.047.733	10.601.006	10.029.888	10.029.888	10.029.888
TTP6R00_5	11.229.311	11.229.311	11.229.311	11.229.311	11.229.311
TTP6R00_6	10.488.766	10.488.766	10.488.766	10.488.766	10.488.766
TTP6R00_7	9.643.304	9.643.304	9.643.304	9.643.304	9.643.304
TTP6R00_8	10.216.736	10.506.212	10.216.736	10.216.736	10.216.736
TTP6R00_9	11.318.027	11.310.615	11.318.027	11.318.027	11.318.027
TTP6R00_10	10.338.094	10.338.094	10.338.094	10.338.094	10.338.094
TTP6R00_11	11.617.228	12.001.726	11.748.128	11.748.128	11.748.128
TTP6R00_12	15.606.292	15.083.189	15.111.339	15.111.339	15.111.339
TTP6R30_1	10.694.964	10.348.135	11.133.700	11.133.700	11.133.700
TTP6R30_2	12.747.926	12.067.617	12.497.569	12.497.569	12.497.569
TTP6R30_3	11.994.006	11.620.984	12.818.295	12.818.295	11.895.091
TTP6R30_4	12.029.103	11.377.953	12.097.371	12.097.371	12.097.371
TTP6R30_5	11.359.654	11.277.490	12.173.669	12.173.669	12.173.669
TTP6R30_6	11.604.214	12.619.002	11.743.992	11.726.667	11.743.992
TTP6R30_7	10.989.641	11.166.666	10.815.395	10.815.395	10.815.395
TTP6R30_8	11.981.486	12.258.304	12.795.419	12.795.419	12.795.419
TTP6R30_9	11.509.846	11.091.431	11.292.080	11.292.080	11.292.080
TTP6R30_10	11.213.419	11.588.858	-	11.067.980	-
TTP6R30_11	12.694.924	12.308.223	-	12.835.034	-
TTP6R30_12	12.788.400	12.580.651	-	11.856.818	-
TTP6R75_1	11.300.698	11.631.661	10.957.039	10.957.039	10.957.039
TTP6R75_2	12.134.633	12.053.957	12.134.633	12.134.633	12.134.633
TTP6R75_3	10.422.286	10.486.905	10.481.601	10.481.601	10.481.601
TTP6R75_4	11.820.891	10.739.156	11.602.306	11.602.306	11.602.306

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

TTP6R75 _5	10.515.673	10.541.464	10.515.673	10.515.673	10.515.673
TTP6R75 _6	9.796.858	10.299.915	10.159.600	10.159.600	10.159.600
TTP6R75 _7	10.087.685	11.600.596	10.086.996	10.086.996	10.086.996
TTP6R75 _8	10.950.483	10.867.597	10.956.135	10.956.135	10.956.135
TTP6R75 _9	10.086.189	10.180.675	10.086.189	10.086.189	10.086.189
TTP6R75 _10	10.115.779	9.828.903	9.947.225	9.947.225	9.947.225
TTP6R75 _11	10.522.787	10.357.760	10.522.787	10.522.787	10.522.787
TTP6R75 _12	11.169.024	10.636.229	11.169.024	11.169.024	11.169.024

TCR_52_Decoordinated costes totales de los 52 periodos de análisis de cada instancia, *TCR_52_Centralized* costes de cada instancia que se ha buscado reducir los costes totales de las tres instancias que ha compartido el primer recurso, *TCR52_Coor_dist* mediante la coordinación distribuida propuesta, *TCR52_Coor_dist_OP1*, la primera entidad oculta capacidad sobrante, *TCR52_Coor_dist_OP2* la primera entidad oculta reducciones de costes que obtiene cuando le ceden recursos, - no se ha encontrado solución dentro del límite de tiempo fijado. Fuente: Elaboración propia.

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

Tabla 0-2: Comparativa del nivel de servicio en los 52 periodos.

Instancia	NSR_ Decoordinated	NSR_Centraliz ed	NSR_Coor_di st	NSR_Coor_dist_O P1	NSR_Coor_dist_O P2
STP1R00_1	0,993	0,993	0,993	0,993	0,993
STP1R00_2	0,989	0,990	0,992	0,990	0,991
STP1R00_3	0,992	0,990	0,990	0,989	0,988
STP1R00_4	0,995	0,994	0,994	0,993	0,993
STP1R00_5	0,982	0,984	0,984	0,983	0,983
STP1R00_6	0,994	0,994	0,993	0,995	0,994
STP1R00_7	0,989	0,987	0,987	0,986	0,987
STP1R00_8	0,993	0,996	0,996	0,995	0,997
STP1R00_9	0,989	0,988	0,988	0,988	0,988
STP1R00_10	0,991	0,994	0,994	0,993	0,994
STP1R00_11	0,993	0,991	0,991	0,991	0,991
STP1R00_12	0,990	0,991	0,991	0,991	0,991
STP1R30_1	0,835	0,834	0,837	0,837	0,832
STP1R30_2	0,837	0,837	0,835	0,830	0,829
STP1R30_3	0,840	0,841	0,848	0,845	0,850
STP1R30_4	0,838	0,837	0,834	0,823	0,826
STP1R30_5	0,827	0,827	0,826	0,835	0,830
STP1R30_6	0,823	0,836	0,829	0,831	0,834
STP1R30_7	0,844	0,830	0,848	0,846	0,843
STP1R30_8	0,839	0,843	0,842	0,839	0,838
STP1R30_9	0,836	0,840	0,835	0,837	0,843
STP1R30_10	0,837	0,838	0,828	0,828	0,833
STP1R30_11	0,832	0,833	0,831	0,832	0,842
STP1R30_12	0,839	0,838	0,838	0,837	0,831
STP1R75_1	0,988	0,990	0,992	0,992	0,993

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

STP1R75_2	0,989	0,993	0,989	0,990	0,987
STP1R75_3	0,992	0,992	0,992	0,990	0,990
STP1R75_4	0,980	0,983	0,982	0,983	0,981
STP1R75_5	0,991	0,989	0,988	0,989	0,989
STP1R75_6	0,990	0,988	0,989	0,993	0,987
STP1R75_7	0,988	0,985	0,985	0,985	0,986
STP1R75_8	0,994	0,992	0,991	0,992	0,990
STP1R75_9	0,987	0,985	0,985	0,986	0,985
STP1R75_10	0,989	0,991	0,991	0,988	0,990
STP1R75_11	0,989	0,989	0,988	0,993	0,990
STP1R75_12	0,994	0,989	0,990	0,988	0,992
STP4R00_1	0,987	0,989	0,990	0,988	0,990
STP4R00_2	0,988	0,988	0,988	0,988	0,988
STP4R00_3	0,988	0,985	0,985	0,988	0,988
STP4R00_4	0,989	0,986	0,986	0,985	0,986
STP4R00_5	0,988	0,990	0,989	0,989	0,989
STP4R00_6	0,994	0,993	0,993	0,993	0,993
STP4R00_7	0,986	0,985	0,985	0,986	0,985
STP4R00_8	0,991	0,988	0,991	0,988	0,989
STP4R00_9	0,990	0,989	0,988	0,989	0,989
STP4R00_10	0,987	0,989	0,990	0,989	0,990
STP4R00_11	0,987	0,985	0,984	0,984	0,986
STP4R00_12	0,988	0,988	0,988	0,988	0,987
STP4R30_1	0,829	0,832	0,831	0,829	0,833
STP4R30_2	0,826	0,826	0,829	0,826	0,827
STP4R30_3	0,833	0,832	0,831	0,829	0,832

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

STP4R30_4	0,812	0,813	0,817	0,817	0,817
STP4R30_5	0,823	0,822	0,830	0,821	0,821
STP4R30_6	0,822	0,821	0,821	0,820	0,820
STP4R30_7	0,823	0,817	0,818	0,825	0,825
STP4R30_8	0,826	0,832	0,830	0,824	0,826
STP4R30_9	0,837	0,833	0,843	0,842	0,837
STP4R30_10	0,828	0,835	0,839	0,841	0,833
STP4R30_11	0,838	0,837	0,828	0,830	0,833
STP4R30_12	0,832	0,835	0,841	0,835	0,838
STP4R75_1	0,986	0,986	0,987	0,988	0,987
STP4R75_2	0,989	0,990	0,990	0,989	0,989
STP4R75_3	0,990	0,988	0,988	0,986	0,987
STP4R75_4	0,988	0,989	0,989	0,987	0,987
STP4R75_5	0,991	0,989	0,988	0,990	0,990
STP4R75_6	0,986	0,986	0,987	0,987	0,984
STP4R75_7	0,983	0,981	0,979	0,983	0,983
STP4R75_8	0,986	0,986	0,986	0,987	0,987
STP4R75_9	0,987	0,988	0,988	0,987	0,988
STP4R75_10	0,988	0,988	0,991	0,987	0,987
STP4R75_11	0,991	0,991	0,991	0,991	0,991
STP4R75_12	0,986	0,986	0,985	0,987	0,987
STP5R00_1	0,970	0,972	0,971	0,971	0,971
STP5R00_2	0,976	0,978	0,978	0,978	0,978
STP5R00_3	0,980	0,980	0,981	0,981	0,981
STP5R00_4	0,974	0,974	0,974	0,974	0,974
STP5R00_5	0,976	0,977	0,977	0,977	0,977

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

STP5R00_6	0,980	0,980	0,979	0,979	0,979
STP5R00_7	0,979	0,978	0,977	0,979	0,979
STP5R00_8	0,976	0,974	0,972	0,976	0,976
STP5R00_9	0,987	0,985	0,986	0,986	0,986
STP5R00_10	0,979	0,982	0,979	0,979	0,979
STP5R00_11	0,979	0,975	0,978	0,978	0,978
STP5R00_12	0,978	0,982	0,977	0,977	0,977
STP5R30_1	0,819	0,830	0,816	0,822	0,822
STP5R30_2	0,824	0,816	0,821	0,817	0,817
STP5R30_3	0,814	0,815	0,815	0,824	0,824
STP5R30_4	0,821	0,823	0,817	0,814	0,814
STP5R30_5	0,827	0,820	0,825	0,826	0,826
STP5R30_6	0,831	0,830	0,833	0,831	0,831
STP5R30_7	0,827	0,831	0,830	0,827	0,827
STP5R30_8	0,816	0,818	0,818	0,818	0,818
STP5R30_9	0,827	0,824	0,829	0,833	0,833
STP5R30_10	0,817	0,823	0,820	0,821	0,821
STP5R30_11	0,818	0,819	0,823	0,822	0,822
STP5R30_12	0,821	0,822	0,815	0,819	0,819
STP5R75_1	0,986	0,986	0,986	0,986	0,986
STP5R75_2	0,979	0,978	0,978	0,978	0,978
STP5R75_3	0,972	0,975	0,974	0,974	0,974
STP5R75_4	0,980	0,977	0,976	0,976	0,976
STP5R75_5	0,978	0,983	0,983	0,981	0,981
STP5R75_6	0,976	0,977	0,977	0,977	0,977
STP5R75_7	0,968	0,972	0,971	0,972	0,972

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

STP5R75_8	0,976	0,976	0,978	0,975	0,975
STP5R75_9	0,980	0,981	0,981	0,982	0,982
STP5R75_10	0,984	0,985	0,983	0,985	0,985
STP5R75_11	0,977	0,979	0,979	0,978	0,978
STP5R75_12	0,977	0,981	0,978	0,982	0,982
STP6R00_1	0,990	0,992	0,990	0,990	0,990
STP6R00_2	0,998	0,997	0,997	0,997	0,997
STP6R00_3	0,997	0,998	0,998	0,998	0,998
STP6R00_4	0,995	0,992	0,994	0,994	0,994
STP6R00_5	0,986	0,988	0,987	0,987	0,987
STP6R00_6	0,998	0,997	0,997	0,997	0,997
STP6R00_7	0,997	0,997	0,999	0,999	0,999
STP6R00_8	0,994	0,990	0,993	0,993	0,993
STP6R00_9	0,998	0,997	0,997	0,997	0,997
STP6R00_10	0,993	0,993	0,989	0,989	0,989
STP6R00_11	0,995	0,996	0,996	0,996	0,996
STP6R00_12	0,994	0,991	0,994	0,994	0,994
STP6R30_1	0,993	0,992	-	-	-
STP6R30_2	0,988	0,988	-	-	-
STP6R30_3	0,992	0,996	-	-	-
STP6R30_4	0,992	0,990	-	-	-
STP6R30_5	0,988	0,991	-	-	-
STP6R30_6	0,995	0,992	-	-	-
STP6R30_7	0,993	0,992	-	-	-
STP6R30_8	0,991	0,990	-	-	-
STP6R30_9	0,994	0,992	-	-	-

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

STP6R30_10	0,994	0,997	-	-	-
STP6R30_11	0,992	0,988	-	-	-
STP6R30_12	0,993	0,995	-	-	-
STP6R75_1	0,996	0,995	0,994	0,994	0,994
STP6R75_2	0,991	0,991	0,994	0,994	0,994
STP6R75_3	0,984	0,984	0,987	0,987	0,987
STP6R75_4	0,993	0,993	0,995	0,995	0,995
STP6R75_5	0,996	0,995	0,995	0,995	0,995
STP6R75_6	0,995	0,995	0,993	0,993	0,993
STP6R75_7	0,993	0,994	0,994	0,994	0,994
STP6R75_8	0,995	0,992	0,994	0,994	0,994
STP6R75_9	0,996	0,994	0,995	0,995	0,995
STP6R75_10	0,993	0,994	0,995	0,995	0,995
STP6R75_11	0,997	0,999	0,996	0,996	0,996
STP6R75_12	0,993	0,992	0,991	0,991	0,991
TTP1R00_1	0,986	0,988	0,987	0,987	0,987
TTP1R00_2	0,995	0,994	0,995	0,995	0,995
TTP1R00_3	0,995	0,994	0,995	0,995	0,995
TTP1R00_4	0,993	0,993	0,993	0,993	0,993
TTP1R00_5	0,991	0,990	0,991	0,991	0,991
TTP1R00_6	0,989	0,989	0,989	0,989	0,989
TTP1R00_7	0,993	0,992	0,992	0,992	0,992
TTP1R00_8	0,992	0,993	0,992	0,992	0,992
TTP1R00_9	0,995	0,995	0,995	0,995	0,995
TTP1R00_10	0,990	0,991	0,993	0,993	0,993
TTP1R00_11	0,992	0,992	0,992	0,993	0,993

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

TTP1R00_12	0,989	0,989	0,989	0,989	0,989
TTP1R30_1	0,977	0,974	0,970	0,967	0,967
TTP1R30_2	0,962	0,975	0,969	0,961	0,966
TTP1R30_3	0,958	0,981	0,970	0,974	0,976
TTP1R30_4	0,962	0,961	0,967	0,971	0,967
TTP1R30_5	0,964	0,973	0,965	0,965	0,971
TTP1R30_6	0,948	0,970	0,951	0,961	0,962
TTP1R30_7	0,959	0,968	0,948	0,963	0,970
TTP1R30_8	0,957	0,964	0,964	0,969	0,957
TTP1R30_9	0,955	0,972	0,956	0,951	0,951
TTP1R30_10	0,929	0,953	0,954	0,939	0,940
TTP1R30_11	0,954	0,959	0,964	0,955	0,949
TTP1R30_12	0,965	0,973	0,958	0,969	0,966
TTP1R75_1	0,991	0,991	0,992	0,992	0,992
TTP1R75_2	0,988	0,986	0,987	0,987	0,987
TTP1R75_3	0,985	0,985	0,985	0,985	0,985
TTP1R75_4	0,991	0,990	0,989	0,989	0,989
TTP1R75_5	0,997	0,997	0,996	0,996	0,996
TTP1R75_6	0,993	0,995	0,994	0,994	0,994
TTP1R75_7	0,982	0,981	0,982	0,982	0,982
TTP1R75_8	0,994	0,992	0,992	0,992	0,992
TTP1R75_9	0,990	0,987	0,987	0,987	0,987
TTP1R75_10	0,992	0,993	0,993	0,992	0,993
TTP1R75_11	0,997	0,992	0,992	0,992	0,992
TTP1R75_12	0,988	0,986	0,986	0,986	0,986
TTP4R00_1	0,987	0,986	0,987	0,987	0,987

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

TTP4R00_2	0,985	0,985	0,985	0,985	0,985
TTP4R00_3	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987
TTP4R00_4	0,989	0,990	0,990	0,990	0,990
TTP4R00_5	0,990	0,990	0,990	0,990	0,990
TTP4R00_6	0,989	0,989	0,989	0,989	0,989
TTP4R00_7	0,984	0,984	0,984	0,984	0,984
TTP4R00_8	0,991	0,991	0,991	0,991	0,991
TTP4R00_9	0,989	0,989	0,989	0,989	0,989
TTP4R00_10	0,990	0,990	0,990	0,990	0,990
TTP4R00_11	0,993	0,992	0,992	0,992	0,992
TTP4R00_12	0,991	0,991	0,991	0,991	0,991
TTP4R30_1	0,939	0,953	0,947	0,947	0,946
TTP4R30_2	0,959	0,950	0,956	0,957	0,955
TTP4R30_3	0,934	0,955	0,943	0,937	0,936
TTP4R30_4	0,944	0,949	0,934	0,941	0,945
TTP4R30_5	0,940	0,949	0,953	0,943	0,945
TTP4R30_6	0,932	0,945	0,942	0,943	0,942
TTP4R30_7	0,956	0,960	0,951	0,951	0,954
TTP4R30_8	0,950	0,952	0,955	0,955	0,964
TTP4R30_9	0,954	0,964	0,956	0,956	0,950
TTP4R30_10	0,946	0,957	0,953	0,950	0,948
TTP4R30_11	0,948	0,961	0,949	0,947	0,952
TTP4R30_12	0,939	0,947	0,938	0,950	0,949
TTP4R75_1	0,988	0,991	0,991	0,991	0,991
TTP4R75_2	0,985	0,985	0,984	0,984	0,984
TTP4R75_3	0,991	0,990	0,990	0,990	0,990

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

TTP4R75_4	0,995	0,996	0,996	0,996	0,996
TTP4R75_5	0,988	0,988	0,988	0,988	0,988
TTP4R75_6	0,979	0,978	0,979	0,979	0,979
TTP4R75_7	0,984	0,985	0,985	0,985	0,985
TTP4R75_8	0,992	0,992	0,992	0,992	0,992
TTP4R75_9	0,991	0,992	0,993	0,993	0,993
TTP4R75_10	0,986	0,986	0,985	0,987	0,985
TTP4R75_11	0,983	0,986	0,984	0,986	0,984
TTP4R75_12	0,985	0,986	0,986	0,985	0,986
TTP5R00_1	0,971	0,971	0,971	0,971	0,971
TTP5R00_2	0,982	0,982	0,982	0,982	0,982
TTP5R00_3	0,976	0,976	0,976	0,976	0,976
TTP5R00_4	0,981	0,977	0,981	0,981	0,981
TTP5R00_5	0,972	0,971	0,971	0,971	0,971
TTP5R00_6	0,979	0,979	0,979	0,979	0,979
TTP5R00_7	0,979	0,980	0,980	0,980	0,980
TTP5R00_8	0,978	0,975	0,975	0,975	0,975
TTP5R00_9	0,974	0,973	0,973	0,973	0,973
TTP5R00_10	0,982	0,982	0,982	0,982	0,982
TTP5R00_11	0,975	0,975	0,976	0,976	0,976
TTP5R00_12	0,985	0,981	0,981	0,981	0,981
TTP5R30_1	0,935	0,950	0,954	0,946	0,946
TTP5R30_2	0,949	0,951	0,951	0,952	0,952
TTP5R30_3	0,948	0,950	0,939	0,945	0,945
TTP5R30_4	0,938	0,944	0,947	0,935	0,935
TTP5R30_5	0,935	0,945	0,936	0,937	0,937

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

TTP5R30_6	0,931	0,937	0,930	0,932	0,932
TTP5R30_7	0,918	0,935	0,926	0,927	0,927
TTP5R30_8	0,929	0,929	0,927	0,929	0,929
TTP5R30_9	0,921	0,933	0,924	0,926	0,926
TTP5R30_10	0,928	0,936	0,925	0,925	0,925
TTP5R30_11	0,932	0,937	0,940	0,937	0,937
TTP5R30_12	0,905	0,922	0,915	0,915	0,915
TTP5R75_1	0,979	0,979	0,979	0,979	0,979
TTP5R75_2	0,976	0,976	0,976	0,976	0,976
TTP5R75_3	0,977	0,976	0,976	0,976	0,976
TTP5R75_4	0,973	0,972	0,972	0,972	0,972
TTP5R75_5	0,973	0,973	0,973	0,973	0,973
TTP5R75_6	0,978	0,978	0,978	0,978	0,978
TTP5R75_7	0,966	0,967	0,967	0,967	0,967
TTP5R75_8	0,981	0,981	0,981	0,981	0,981
TTP5R75_9	0,979	0,977	0,978	0,978	0,978
TTP5R75_10	0,975	0,975	0,975	0,975	0,975
TTP5R75_11	0,973	0,973	0,973	0,973	0,973
TTP5R75_12	0,970	0,970	0,970	0,970	0,970
TTP6R00_1	0,995	0,997	0,995	0,995	0,995
TTP6R00_2	0,990	0,993	0,990	0,990	0,990
TTP6R00_3	0,993	0,992	0,992	0,992	0,992
TTP6R00_4	0,997	0,994	0,997	0,997	0,997
TTP6R00_5	0,993	0,993	0,993	0,993	0,993
TTP6R00_6	0,994	0,994	0,994	0,994	0,994
TTP6R00_7	0,996	0,996	0,996	0,996	0,996

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

TTP6R00_8	0,997	0,996	0,997	0,997	0,997
TTP6R00_9	0,992	0,992	0,992	0,992	0,992
TTP6R00_10	0,994	0,994	0,994	0,994	0,994
TTP6R00_11	0,992	0,990	0,991	0,991	0,991
TTP6R00_12	0,982	0,984	0,983	0,983	0,983
TTP6R30_1	0,996	0,997	0,994	0,994	0,994
TTP6R30_2	0,991	0,993	0,991	0,991	0,991
TTP6R30_3	0,994	0,994	0,992	0,992	0,994
TTP6R30_4	0,995	0,997	0,994	0,994	0,994
TTP6R30_5	0,995	0,995	0,992	0,992	0,992
TTP6R30_6	0,994	0,989	0,994	0,994	0,994
TTP6R30_7	0,996	0,995	0,997	0,997	0,997
TTP6R30_8	0,995	0,998	0,995	0,995	0,995
TTP6R30_9	0,995	0,997	0,994	0,994	0,994
TTP6R30_10	0,995	0,996	-	0,996	-
TTP6R30_11	0,993	0,992	-	0,994	-
TTP6R30_12	0,993	0,992	-	0,996	-
TTP6R75_1	0,993	0,992	0,994	0,994	0,994
TTP6R75_2	0,990	0,990	0,990	0,990	0,990
TTP6R75_3	0,995	0,993	0,995	0,995	0,995
TTP6R75_4	0,992	0,996	0,991	0,991	0,991
TTP6R75_5	0,996	0,996	0,996	0,996	0,996
TTP6R75_6	0,996	0,997	0,995	0,995	0,995
TTP6R75_7	0,997	0,991	0,997	0,997	0,997
TTP6R75_8	0,996	0,996	0,995	0,995	0,995
TTP6R75_9	0,997	0,996	0,997	0,997	0,997

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

TTP6R75_10	0,997	0,998	0,998	0,998	0,998
TTP6R75_11	0,996	0,996	0,996	0,996	0,996
TTP6R75_12	0,992	0,994	0,992	0,992	0,992

NSR_Centralized nivel de servicio de cada instancia en los 52 periodos de análisis donde se ha buscado reducir los costes totales de las tres instancias que han compartido el primer recurso, *NSR_Deordinated* nivel de servicio de los 52 periodos de análisis de cada instancia, *NSR_Coor_dist* mediante la coordinación distribuida propuesta, *NSR_Coor_dist_OP1*, la primera entidad oculta capacidad sobrante, *NSR_Coor_dist_OP2* la primera entidad oculta reducciones de costes que obtiene cuando le ceden recursos, - no se ha encontrado solución dentro del límite de tiempo fijado. Fuente: Elaboración propia.

ANEXO 4: Tablas comparativas del número de periodos en los que se comparte capacidad entre las entidades

Tabla 0-3: Número de periodos ejecutados que se comparte capacidad entre las entidades

Instancia	Coor_dist	Coor_dist_Op1	Coor_dist_Op2
STP1R00_1	10	8	10
STP1R00_2	10	8	10
STP1R00_3	10	8	10
STP1R00_4	4	9	8
STP1R00_5	4	9	8
STP1R00_6	4	9	8
STP1R00_7	5	10	3
STP1R00_8	5	10	3
STP1R00_9	5	10	3
STP1R00_10	11	9	8
STP1R00_11	11	9	8
STP1R00_12	11	9	8
STP1R30_1	9	8	8
STP1R30_2	9	8	8
STP1R30_3	9	8	8
STP1R30_4	9	9	10
STP1R30_5	9	9	10
STP1R30_6	9	9	10
STP1R30_7	10	9	11
STP1R30_8	10	9	11
STP1R30_9	10	9	11
STP1R30_10	11	11	11
STP1R30_11	11	11	11
STP1R30_12	11	11	11
STP1R75_1	18	18	16
STP1R75_2	18	18	16
STP1R75_3	18	18	16
STP1R75_4	22	24	18
STP1R75_5	22	24	18
STP1R75_6	22	24	18
STP1R75_7	17	22	14
STP1R75_8	17	22	14
STP1R75_9	17	22	14
STP1R75_10	20	16	20
STP1R75_11	20	16	20
STP1R75_12	20	16	20
STP4R00_1	6	6	7
STP4R00_2	6	6	7

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

STP4R00_3	6	6	7
STP4R00_4	9	8	9
STP4R00_5	9	8	9
STP4R00_6	9	8	9
STP4R00_7	4	4	3
STP4R00_8	4	4	3
STP4R00_9	4	4	3
STP4R00_10	5	5	5
STP4R00_11	5	5	5
STP4R00_12	5	5	5
STP4R30_1	7	7	8
STP4R30_2	7	7	8
STP4R30_3	7	7	8
STP4R30_4	7	9	9
STP4R30_5	7	9	9
STP4R30_6	7	9	9
STP4R30_7	7	7	7
STP4R30_8	7	7	7
STP4R30_9	7	7	7
STP4R30_10	8	8	7
STP4R30_11	8	8	7
STP4R30_12	8	8	7
STP4R75_1	13	14	15
STP4R75_2	13	14	15
STP4R75_3	13	14	15
STP4R75_4	17	16	17
STP4R75_5	17	16	17
STP4R75_6	17	16	17
STP4R75_7	12	16	14
STP4R75_8	12	16	14
STP4R75_9	12	16	14
STP4R75_10	12	14	12
STP4R75_11	12	14	12
STP4R75_12	12	14	12
STP5R00_1	1	1	1
STP5R00_2	1	1	1
STP5R00_3	1	1	1
STP5R00_4	4	4	4
STP5R00_5	4	4	4
STP5R00_6	4	4	4
STP5R00_7	3	3	3
STP5R00_8	3	3	3
STP5R00_9	3	3	3
STP5R00_10	3	5	5
STP5R00_11	3	5	5

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

STP5R00_12	3	5	5
STP5R30_1	6	8	8
STP5R30_2	6	8	8
STP5R30_3	6	8	8
STP5R30_4	6	7	7
STP5R30_5	6	7	7
STP5R30_6	6	7	7
STP5R30_7	8	8	8
STP5R30_8	8	8	8
STP5R30_9	8	8	8
STP5R30_10	5	6	6
STP5R30_11	5	6	6
STP5R30_12	5	6	6
STP5R75_1	12	11	11
STP5R75_2	12	11	11
STP5R75_3	12	11	11
STP5R75_4	12	14	14
STP5R75_5	12	14	14
STP5R75_6	12	14	14
STP5R75_7	18	17	17
STP5R75_8	18	17	17
STP5R75_9	18	17	17
STP5R75_10	12	13	13
STP5R75_11	12	13	13
STP5R75_12	12	13	13
STP6R00_1	0	0	0
STP6R00_2	0	0	0
STP6R00_3	0	0	0
STP6R00_4	0	0	0
STP6R00_5	0	0	0
STP6R00_6	0	0	0
STP6R00_7	0	0	0
STP6R00_8	0	0	0
STP6R00_9	0	0	0
STP6R00_10	0	0	0
STP6R00_11	0	0	0
STP6R00_12	0	0	0
STP6R30_1	-	-	-
STP6R30_2	-	-	-
STP6R30_3	-	-	-
STP6R30_4	-	-	-
STP6R30_5	-	-	-
STP6R30_6	-	-	-
STP6R30_7	-	-	-
STP6R30_8	-	-	-

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

STP6R30_9	-	-	-
STP6R30_10	-	-	-
STP6R30_11	-	-	-
STP6R30_12	-	-	-
STP6R75_1	0	0	0
STP6R75_2	0	0	0
STP6R75_3	0	0	0
STP6R75_4	0	0	0
STP6R75_5	0	0	0
STP6R75_6	0	0	0
STP6R75_7	0	0	0
STP6R75_8	0	0	0
STP6R75_9	0	0	0
STP6R75_10	0	0	0
STP6R75_11	0	0	0
STP6R75_12	0	0	0
TTP1R00_1	0	0	0
TTP1R00_2	0	0	0
TTP1R00_3	0	0	0
TTP1R00_4	1	1	1
TTP1R00_5	1	1	1
TTP1R00_6	1	1	1
TTP1R00_7	3	3	3
TTP1R00_8	3	3	3
TTP1R00_9	3	3	3
TTP1R00_10	0	0	0
TTP1R00_11	0	0	0
TTP1R00_12	0	0	0
TTP1R30_1	43	43	47
TTP1R30_2	43	43	47
TTP1R30_3	43	43	47
TTP1R30_4	40	44	46
TTP1R30_5	40	44	46
TTP1R30_6	40	44	46
TTP1R30_7	38	33	38
TTP1R30_8	38	33	38
TTP1R30_9	38	33	38
TTP1R30_10	45	43	42
TTP1R30_11	45	43	42
TTP1R30_12	45	43	42
TTP1R75_1	3	3	3
TTP1R75_2	3	3	3
TTP1R75_3	3	3	3
TTP1R75_4	5	5	5
TTP1R75_5	5	5	5

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

TTP1R75_6	5	5	5
TTP1R75_7	2	2	2
TTP1R75_8	2	2	2
TTP1R75_9	2	2	2
TTP1R75_10	5	5	5
TTP1R75_11	5	5	5
TTP1R75_12	5	5	5
TTP4R00_1	0	0	0
TTP4R00_2	0	0	0
TTP4R00_3	0	0	0
TTP4R00_4	1	1	1
TTP4R00_5	1	1	1
TTP4R00_6	1	1	1
TTP4R00_7	0	0	0
TTP4R00_8	0	0	0
TTP4R00_9	0	0	0
TTP4R00_10	0	0	0
TTP4R00_11	0	0	0
TTP4R00_12	0	0	0
TTP4R30_1	39	37	36
TTP4R30_2	39	37	36
TTP4R30_3	39	37	36
TTP4R30_4	36	38	37
TTP4R30_5	36	38	37
TTP4R30_6	36	38	37
TTP4R30_7	37	37	41
TTP4R30_8	37	37	41
TTP4R30_9	37	37	41
TTP4R30_10	37	38	37
TTP4R30_11	37	38	37
TTP4R30_12	37	38	37
TTP4R75_1	4	5	5
TTP4R75_2	4	5	5
TTP4R75_3	4	5	5
TTP4R75_4	1	1	1
TTP4R75_5	1	1	1
TTP4R75_6	1	1	1
TTP4R75_7	2	2	2
TTP4R75_8	2	2	2
TTP4R75_9	2	2	2
TTP4R75_10	0	3	0
TTP4R75_11	0	3	0
TTP4R75_12	0	3	0
TTP5R00_1	0	0	0
TTP5R00_2	0	0	0

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

TTP5R00_3	0	0	0
TTP5R00_4	0	0	0
TTP5R00_5	0	0	0
TTP5R00_6	0	0	0
TTP5R00_7	0	0	0
TTP5R00_8	0	0	0
TTP5R00_9	0	0	0
TTP5R00_10	1	1	1
TTP5R00_11	1	1	1
TTP5R00_12	1	1	1
TTP5R30_1	40	37	37
TTP5R30_2	40	37	37
TTP5R30_3	40	37	37
TTP5R30_4	32	33	33
TTP5R30_5	32	33	33
TTP5R30_6	32	33	33
TTP5R30_7	28	36	36
TTP5R30_8	28	36	36
TTP5R30_9	28	36	36
TTP5R30_10	33	35	35
TTP5R30_11	33	35	35
TTP5R30_12	33	35	35
TTP5R75_1	2	2	2
TTP5R75_2	2	2	2
TTP5R75_3	2	2	2
TTP5R75_4	2	2	2
TTP5R75_5	2	2	2
TTP5R75_6	2	2	2
TTP5R75_7	3	3	3
TTP5R75_8	3	3	3
TTP5R75_9	3	3	3
TTP5R75_10	0	0	0
TTP5R75_11	0	0	0
TTP5R75_12	0	0	0
TTP6R00_1	0	0	0
TTP6R00_2	0	0	0
TTP6R00_3	0	0	0
TTP6R00_4	0	0	0
TTP6R00_5	0	0	0
TTP6R00_6	0	0	0
TTP6R00_7	0	0	0
TTP6R00_8	0	0	0
TTP6R00_9	0	0	0
TTP6R00_10	0	0	0
TTP6R00_11	0	0	0

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

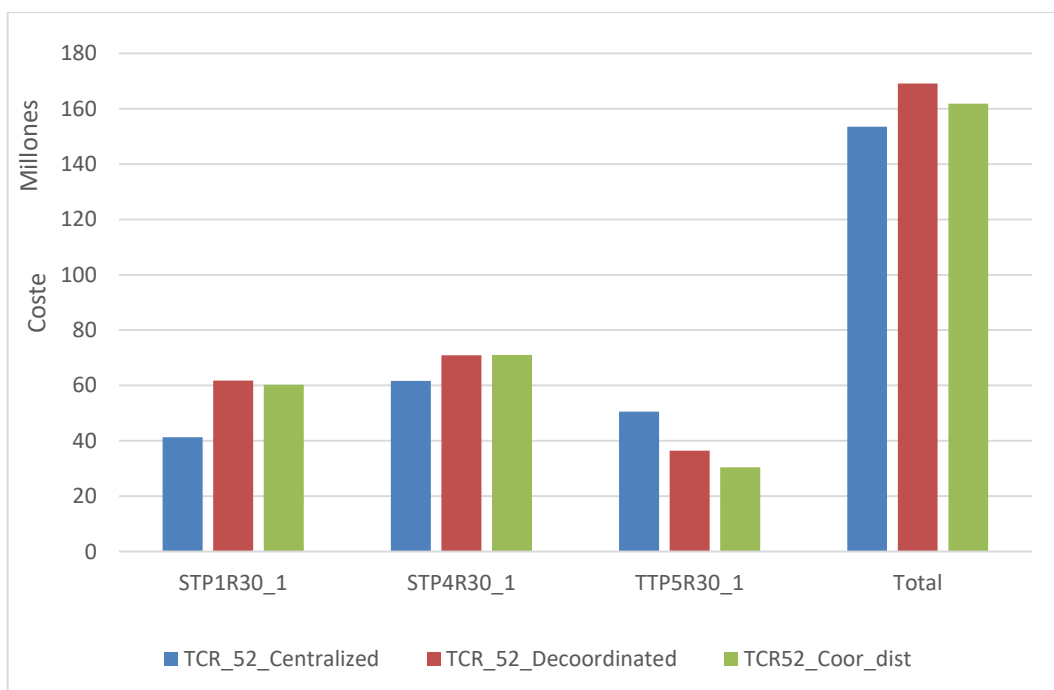
TTP6R00_12	0	0	0
TTP6R30_1	1	1	2
TTP6R30_2	1	1	2
TTP6R30_3	1	1	2
TTP6R30_4	2	2	2
TTP6R30_5	2	2	2
TTP6R30_6	2	2	2
TTP6R30_7	2	2	2
TTP6R30_8	2	2	2
TTP6R30_9	2	2	2
TTP6R30_10	-	2	-
TTP6R30_11	-	2	-
TTP6R30_12	-	2	-
TTP6R75_1	0	0	0
TTP6R75_2	0	0	0
TTP6R75_3	0	0	0
TTP6R75_4	0	0	0
TTP6R75_5	0	0	0
TTP6R75_6	0	0	0
TTP6R75_7	0	0	0
TTP6R75_8	0	0	0
TTP6R75_9	0	0	0
TTP6R75_10	0	0	0
TTP6R75_11	0	0	0
TTP6R75_12	0	0	0

Coor_dist mediante la coordinación distribuida propuesta, *Coor_dist_OP1*, la primera entidad oculta capacidad sobrante, *Coor_dist_OP2* la primera entidad oculta reducciones de costes que obtiene cuando le ceden recursos, - no se ha encontrado solución dentro del límite de tiempo fijado. Fuente: Elaboración propia.

ANEXO 5: Comparativas entre las propuestas de planificación de las operaciones por los diferentes procedimientos de las instancias STP1R30_1, STP4R30_1 y TTP5R30_1

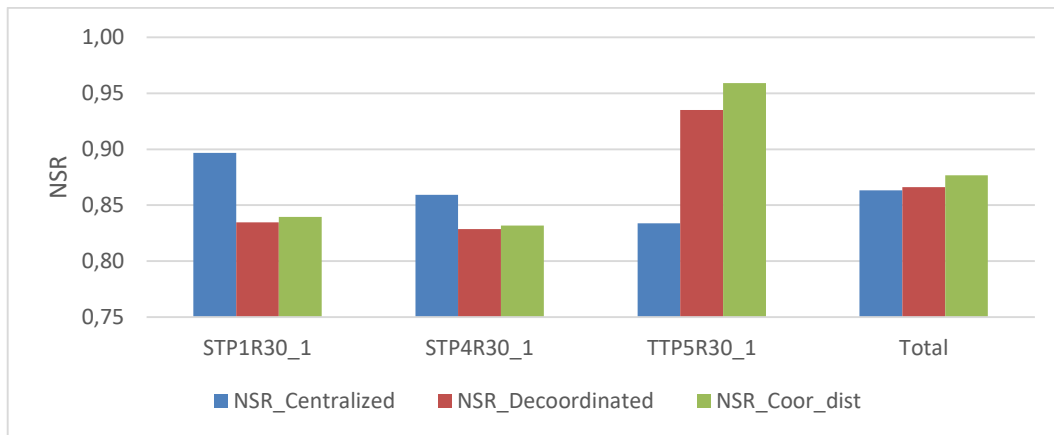
La comparativa entre las diferentes propuestas de planificación de operaciones para las entidades STP1R30_1, STP4R30_1 y TTP5R30_1 se puede observar en la Figura 0-1 la representación de los costes de los 52 periodos analizados y en la Figura 0-2 la representación de los niveles de servicio de los 52 periodos analizados. Las 3 entidades mejoran en los medibles con la propuesta de planificación con la coordinación distribuida respecto de la planificación descentralizada-descoordinada. Es de resaltar, el mejor resultado en el coste acumulado con la propuesta de planificación con coordinación centralizada para las 3 entidades, pero esta implica una peor solución para la entidad TTP5R30_1 respecto de la planificación descentralizada-descoordinada o la planificación con coordinación distribuida. El mejor nivel de servicio promedio de las tres entidades se logra con la propuesta de planificación con coordinación distribuida. La distribución de demandas se puede observar en la Figura 0-3 y en la Figura 0-4 se pueden observar las compensaciones fijadas.

Figura 0-1: Comparativa de costes entre los distintos procedimientos de planificación de operaciones



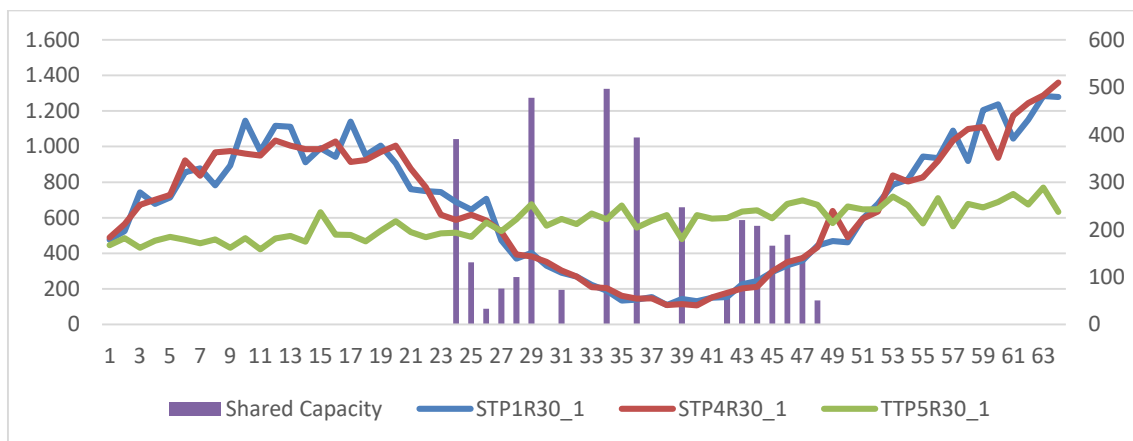
Fuente: Elaboración propia.

Figura 0-2: Comparativa del nivel de servicio entre los distintos procedimientos de planificación de operaciones



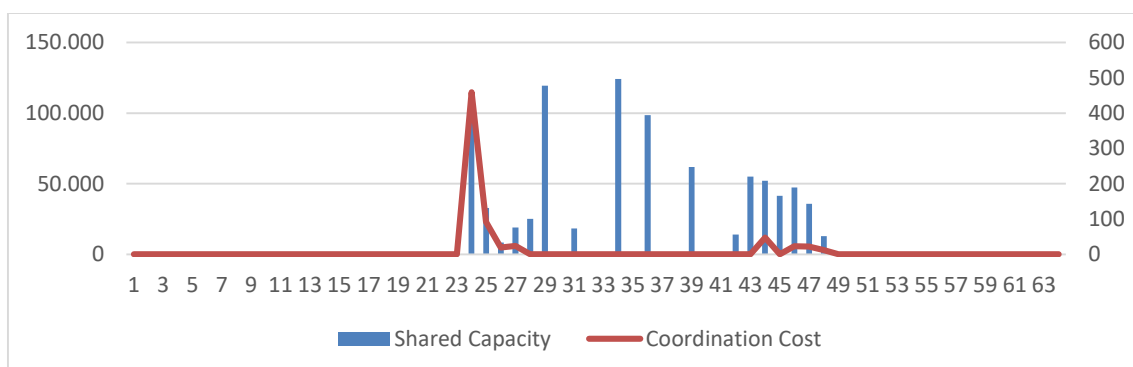
Fuente: Elaboración propia.

Figura 0-3: Representación gráfica de la demanda agregada de los productos de las entidades STP1R30_1, STP4R30_1, TTP5R30_1 y las capacidades compartidas entre entidades.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 0-4: Representación gráfica del recurso compartido en el periodo ejecutado y los intercambios de las compensaciones por los recursos compartidos entre las entidades STP1R30_1, STP4R30_1, TTP5R30_1.



Fuente: Elaboración propia.

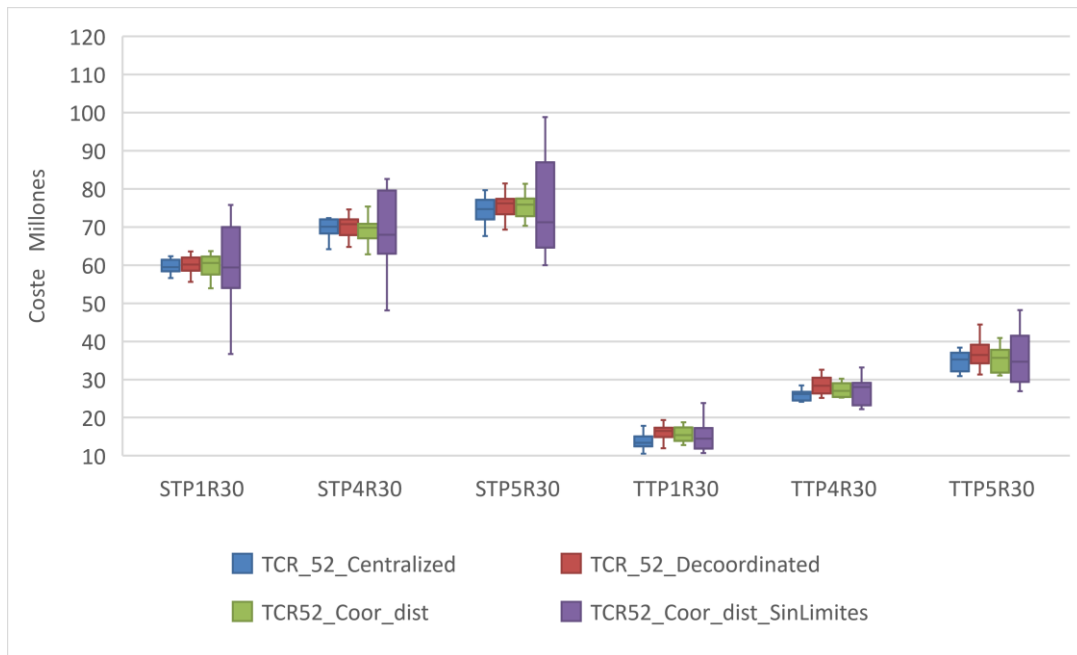
ANEXO 6: Comparativas de la planificación de operaciones distribuida cuando no se establecen límites a los multiplicadores de Lagrange.

En la Figura 0-5 se representan las distribuciones que toman los costes totales de los 52 periodos de análisis de las planificaciones de las operaciones con las distintas herramientas. En esa figura se puede observar que no fijar un límite a los multiplicadores genera costes cercanos a los valores de la planificación con coordinación centralizada, pero con una mayor dispersión. En la planificación de operaciones con coordinación distribuida sin limitación en los multiplicadores de Lagrange se aumenta el número de periodos en los que se comparte capacidad, tal y como se puede observar en la Figura 0-7 pero con mayor dispersión en los costes respecto de los otros procedimientos de planificación. Los niveles de servicio son equivalentes, tal y como se puede observar en la Figura 0-6.

Esta no limitación en los multiplicadores de Lagrange implica planificaciones difícilmente aplicables industrialmente, tal y como en el periodo 18 se propone una compensación de 11.131.782 u.m que se puede apreciar en la Figura 0-9, siendo esta el 23,4% del valor de la función objetivo en el tramo en el que se planifica del periodo 18 o si se compara con los costes totales de los 52 periodos de análisis de la planificación de operaciones con descentralizada-descoordinada implica un 17,5% del mismo. En la Figura 0-8 se pueden observar los periodos donde se propone compartir capacidad. En la Figura 0-9 se pueden observar las compensaciones fijadas. Los valores de esta coordinación se pueden observar en las siguientes tablas : Tabla 0-4, Tabla 0-5, Tabla 0-6 y Tabla 0-7.

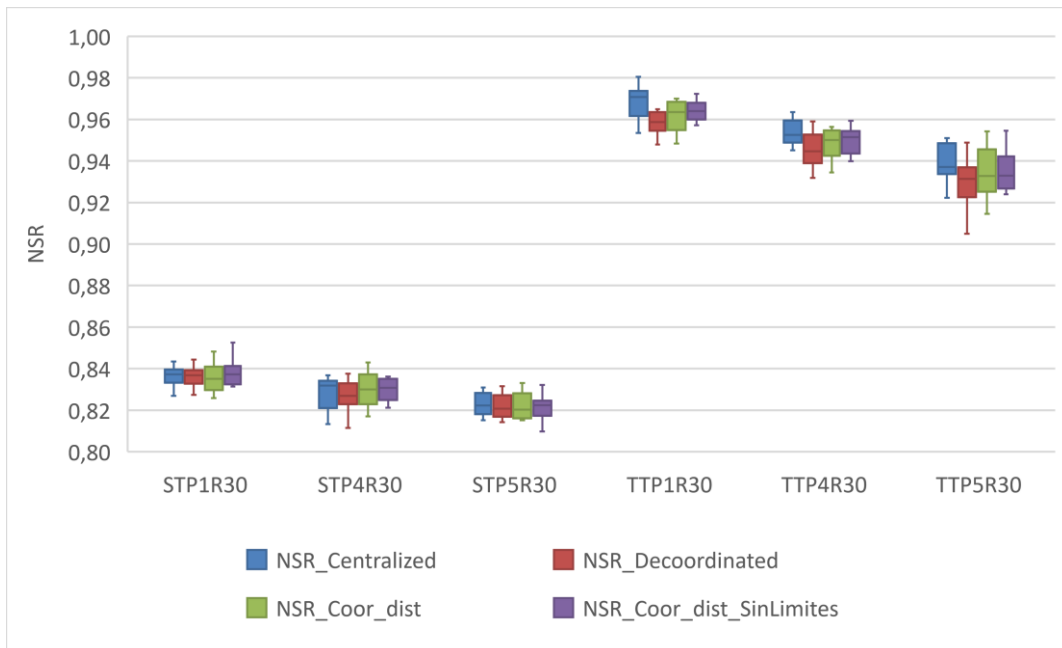
Realizar la coordinación sin limitación en los multiplicadores consigue que la función objetivo acumulada de las tres entidades se acerque a los costes de la planificación con coordinación centralizada, pero propone propuestas de planificación a las entidades que no deberían ser asumibles por las entidades, al implicar compensaciones tan elevadas con respecto a los costes de planificación de la entidad.

Figura 0-5: Comparativa de costes totales de los 52 periodos de estudio entre la planificación descentralizada-descoordinada y coordinación centralizada, distribuida y distribuida sin límite a los multiplicadores de Lagrange, donde cada tres entidades comparten la capacidad del primer recurso.



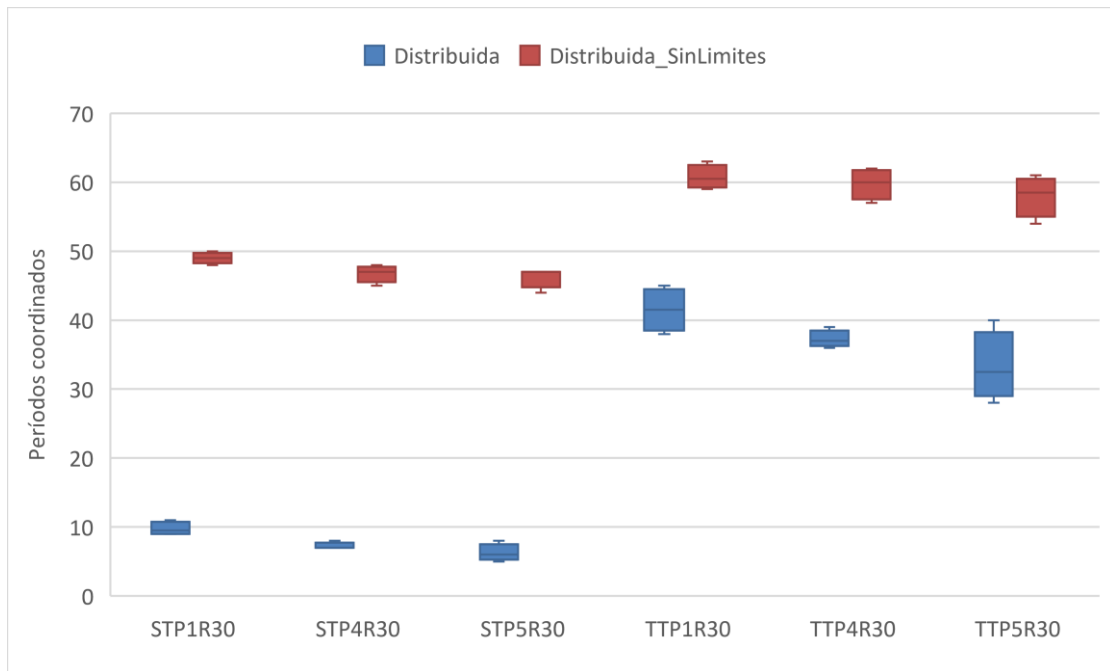
Fuente: Elaboración propia.

Figura 0-6: Comparativa del nivel de servicio de los 52 periodos de estudio entre la planificación descentralizada-descoordinada y coordinación centralizada, distribuida y distribuida sin límite a los multiplicadores de Lagrange, donde cada tres entidades comparten la capacidad del primer recurso.



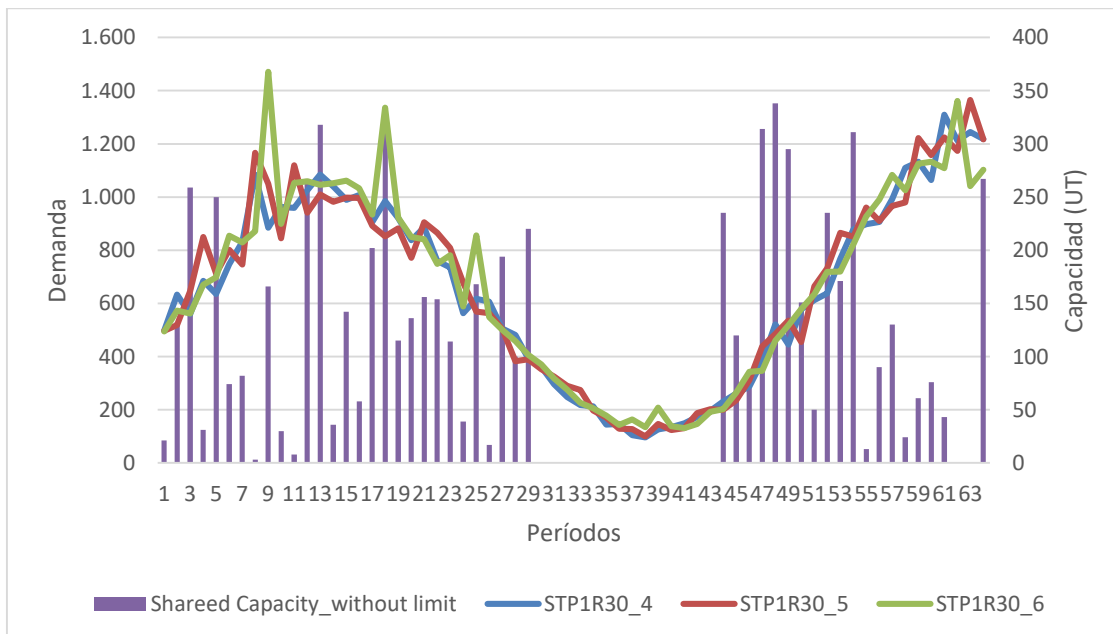
Fuente: Elaboración propia.

Figura 0-7: Número de periodos ejecutados que se comparte capacidad entre las entidades



Fuente: Elaboración propia.

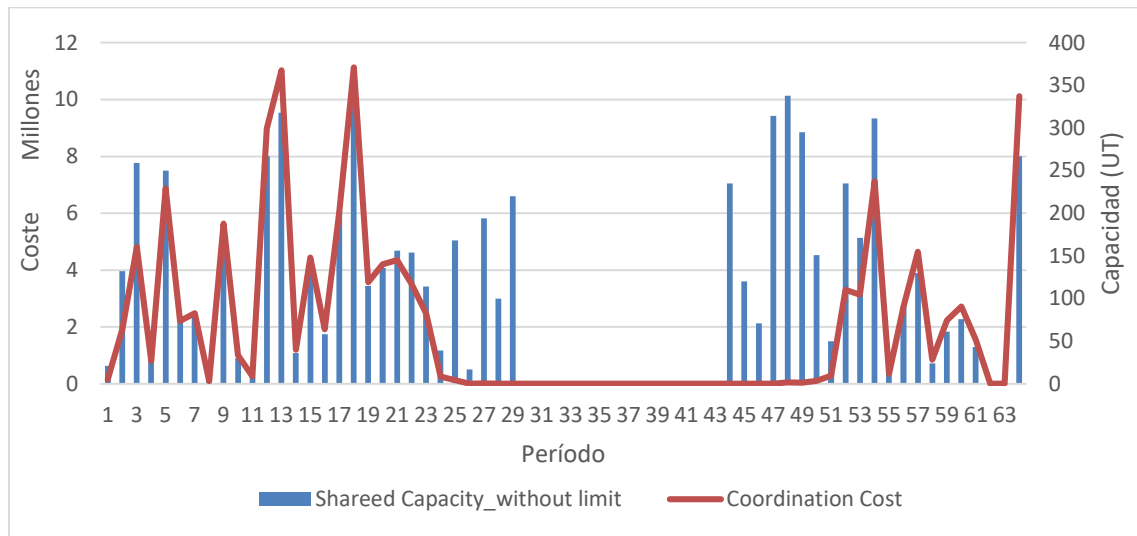
Figura 0-8: Representación gráfica de la demanda agregada de los productos de las entidades STP1R30_4, 5, 6 y las capacidades compartidas entre entidades, sin limitación en los multiplicadores de Lagrange.



Fuente: Elaboración propia.

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

Figura 0-9: Representación gráfica del recurso compartido en el periodo ejecutado y los intercambios de las compensaciones por los recursos compartidos entre las entidades STP5R30_4, 5, 6 , sin limitación en los multiplicadores de Lagrange.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 0-4: Costes totales de los 52 periodos analizados de las instancias STP1R30_4, STP1R30_5, STP1R30_6 sin limitación en los multiplicadores de Lagrange.

	Coste total 52 periodos descentralizada-descoordinadas	Coste total Coordinación distribuida sin límites multiplicadores de Lagrange	Compensaciones	Coste total 52 periodos Coordinación centralizada
STP1R30_4	63.525.363	71.669.081	11.436.240	60.939.399
STP1R30_5	62.088.659	57.828.737	6.291.850	62.325.850
STP1R30_6	63.637.198	60.135.086	-17.728.090	59.147.473
Sumatorio	189.251.220	189.632.904	0	182.412.722

Fuente: Elaboración propia.

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

Tabla 0-5: Comparativa de los costes totales de los 52 periodos analizados de las instancias STP1R30_4, STP1R30_5, STP1R30_6 entre la planificación descentralizada-descoordinada y coordinación centralizada , distribuida y distribuida sin límite a los multiplicadores de Lagrange, donde cada tres entidades comparten la capacidad del primer recurso.

	Coste total 52 periodos descentralizada-descoordinadas	Coste total Coordinación distribuida	Coste total Coordinación distribuida sin límites multiplicadores de Lagrange	Coste total 52 periodos Coordinación centralizada
STP1R30_4	63.525.363	61.762.080	71.669.081	60.939.399
STP1R30_5	62.088.659	63.650.293	57.828.737	62.325.850
STP1R30_6	63.637.198	60.699.475	60.135.086	59.147.473
Promedio	189.251.220	186.111.848	189.632.904	182.412.722

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 0-6: Comparativa de los niveles de servicio en los 52 periodos analizados de las instancias STP1R30_4, STP1R30_5, STP1R30_6 entre la planificación descentralizada-descoordinada y coordinación centralizada , distribuida y distribuida sin límite a los multiplicadores de Lagrange, donde cada tres entidades comparten la capacidad del primer recurso.

	Nivel de servicio descentralizada-descoordinadas	Nivel de servicio Coordinación distribuida	Nivel de servicio Coordinación distribuida sin límites multiplicadores de Lagrange	Nivel de servicio Coordinación centralizada
STP1R30_4	0,84	0,83	0,83	0,84
STP1R30_5	0,83	0,83	0,83	0,83
STP1R30_6	0,82	0,83	0,82	0,84
	0,83	0,83	0,83	0,83

Fuente: Elaboración propia.

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

Tabla 0-7: Comparativa de los valores de la función objetivo en los 52 tramos planificados de las instancias STP1R30_4, STP1R30_5, STP1R30_6 entre la planificación descentralizada-descoordinada y coordinación centralizada, distribuida y distribuida sin límite a los multiplicadores de Lagrange, donde cada tres entidades comparten la capacidad del primer recurso.

	Coste total 64 periodos descentralizada-descoordinadas	Coste total 64 periodos Coordinación distribuida	Coste total 64 periodos Coordinación distribuida sin límites multiplicadores de Lagrange	Coste total 64 periodos Coordinación centralizada
STP1R30_4	1.850.684.343	1.881.983.722	1.870.512.729	1.852.258.925
STP1R30_5	1.916.956.842	1.955.635.577	1.900.030.083	1.863.260.799
STP1R30_6	1.918.839.907	1.876.004.961	1.932.404.272	1.859.264.853
	5.686.481.091	5.713.624.260	5.702.947.084	5.574.784.576

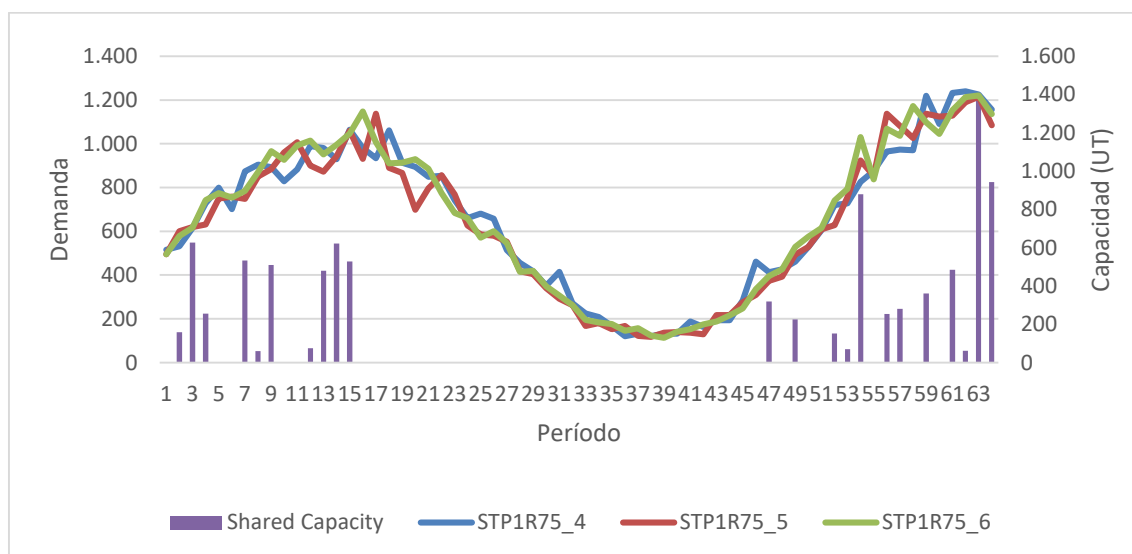
Fuente: Elaboración propia.

ANEXO 7: Análisis de las propuestas de planificación con coordinación distribuida de otras entidades.

Las instancias STP1R75 son las que presentan los mayores intercambios de recursos en las demandas tipo (ST) en la Figura 7-10, por lo que se procede al análisis de las propuestas de planificación del conjunto de instancias STP1R75_4, STP1R75_5 y STP1R75_6 en este anexo.

En la Figura 0-10 y en Figura 0-11 se pueden observar los detalles del comportamiento de la entidad STP1R75_4 que comparte su capacidad (R1) con las entidades STP1R75_5 y STP1R75_6. En la Figura 0-10 se pueden observar que las entidades comparten capacidades en los periodos con demanda creciente. En los periodos de baja demanda ninguna de las entidades tiene necesidad de capacidad extra. Además, se pueden observar que, en los periodos con demanda decreciente, las entidades parten de situaciones de stock más holgadas por lo que requieren de menos capacidad extra. En total las 3 entidades comparten capacidad en 22 de los periodos ejecutados.

Figura 0-10: Representación gráfica de la demanda agregada de los productos de las entidades STP1R75_4, 5, 6 y las capacidades compartidas entre entidades.



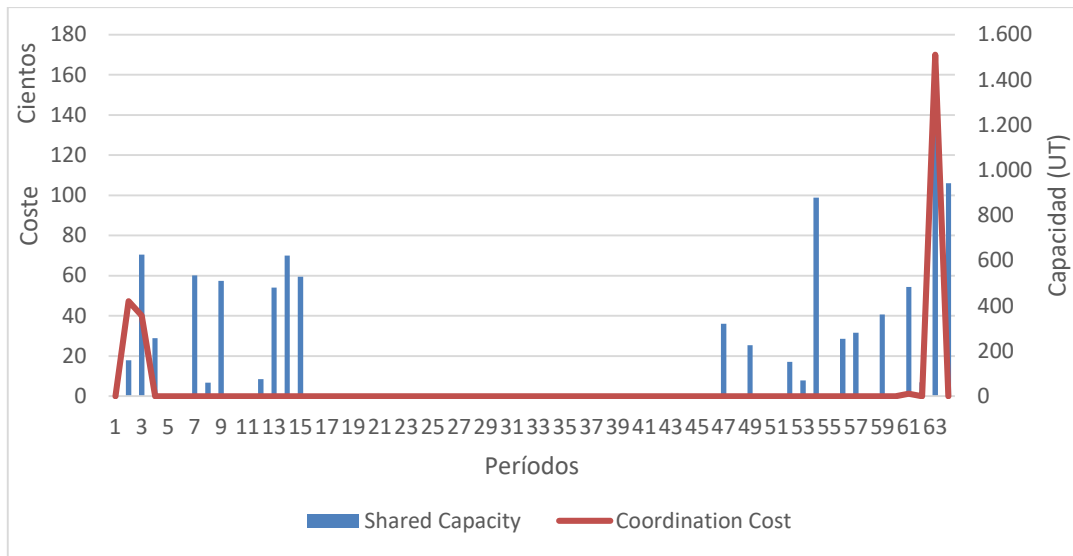
STP5R30_4 demanda estacional creciente, estructura producto P1, Recursos disponibles al 30%, instancia 4.

Fuente: Elaboración propia.

Si se observa la Figura 0-11, se puede apreciar que en la mayoría de periodos la capacidad acumulada de las 3 entidades es suficiente para las demandas acumuladas, por lo que la compensación por el derecho de uso es nula. En 18 periodos se cede capacidad siendo las compensaciones nulas. En el periodo 63 es donde se realizan las mayores compensaciones por el derecho de uso de los recursos compartidos.

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

Figura 0-11: Representación gráfica del recurso compartido en el periodo ejecutado y los intercambios de las compensaciones por los recursos compartidos entre las entidades STP1R75_4, 5, 6.



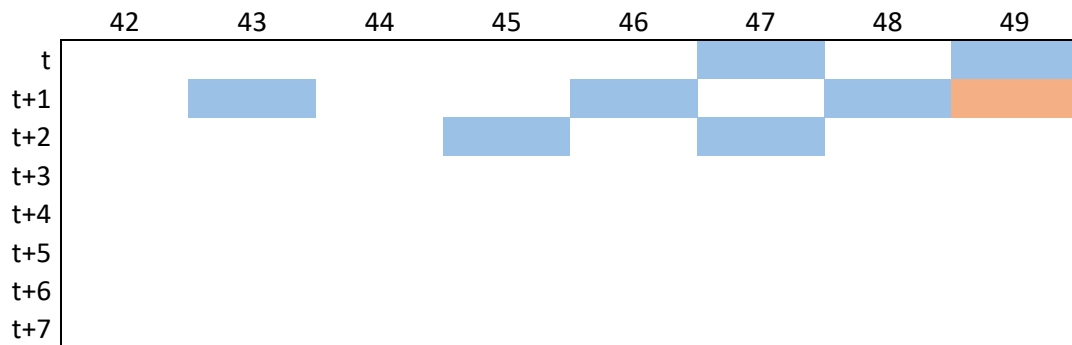
Shared Capacity, recursos compartidos entre las entidades; *Coordination Cost*, compensación realizada entre entidades por los recursos compartidos. Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 0-4 muestra las compensaciones por unidad de los recursos compartidos que se han establecido por la entidad STP1R75_4 con las otras entidades STP1R75_5 y STP1R75_6. Las compensaciones pueden encontrarse en los 8 periodos planificados en cada uno de los tramos en los que se planifica. En la tabla se presentan las compensaciones unitarias de los tramos en los que se planifica para los periodos entre el periodo 42 y el periodo 49. Las compensaciones sombreadas de azul identifican los periodos en los cuales la entidad prevé ceder capacidad y con el sombreado en naranja los periodos en los que la entidad prevé necesitar una capacidad superior a la de sus recursos propios. La fila identificada con *t* recopila las compensaciones de los periodos que se ejecutan y el resto de filas son los datos relacionados con los siguientes periodos en ese tramo en el que se planifica. Las compensaciones con valor 0 no aparecen en la tabla.

Se puede observar de la Tabla 0-4 que las entidades han definido compensación unitaria igual a 0 ya que disponen de suficiente capacidad entre las 3 entidades. En el total de periodos ejecutados, 64 periodos, las entidades comparten capacidad en 22 periodos, pero solo en 4 de esos periodos se fijan compensaciones unitarias. En 18 de los periodos ejecutados, las capacidades se comparten sin compensaciones unitarias por el derecho de utilizarlas.

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

Tabla 0-8: Compensaciones unitarias por el derecho de uso de los recursos compartidos entre las entidades STP1R75_4



Sombreado naranja los periodos previstos de coordinación en los que se requiere capacidad de otra entidad, sombreado azul los periodos previstos de coordinación en los que se cede capacidad a las otras entidades y las cifras son las compensaciones unitarias. Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 0-5, se presentan los costes totales de los 52 periodos de análisis de las instancias STP1R75_4, STP1R75_5 y STP1R75_6. Se observa que la suma de los costes de las propuestas de planificación del periodo a ejecutar con coordinación distribuida para las 3 instancias es inferior que la propuesta de planificación con coordinación centralizada. La suma de costes de las propuestas de planificación con coordinación centralizada es mayor que los costes de la propuesta de planificación con coordinación distribuida y descentralizada-descoordinada. Si se observan las entidades por separado, no todas ellas consiguen una reducción de costes. Pero debe recordar que la entidad STP1R75_5 ha conseguido capacidad de las otras entidades en 13 periodos y ha cedido capacidad en 9 periodos. La propuesta de planificación con coordinación distribuida de la instancia STP1R75_5 cede capacidad en 2 periodos con una compensación y en 2 periodos obtiene capacidad extra con un sobrecoste. La entidad realiza una compensación total de 21.644 u.m. para lograr capacidad de 2 periodos y recibe una compensación de 4.029 u.m. por los periodos en que cede capacidad, dando un saldo de 17.615 u.m. Por lo tanto, aunque inicialmente la entidad asimilada a la instancia STP1R75_5 pudiera no estar interesada en la coordinación, por el incremento de costes calculados, esta coordinación le permite compartir capacidades. En la Figura 0-12 se pueden observar los periodos en los que la entidad prevé requerir capacidad, sombreados en naranja y los periodos en los que prevé ceder capacidad, sombreado en azul en cada tramo en el que se planifica.

La Tabla 0-10 presentan los niveles de servicio de las mismas instancias con las diferentes propuestas de planificación de operaciones, sin observar una variación superior al 1% entre ellas, por lo que no se puede llegar a una conclusión en ningún sentido.

Modelos y Algoritmos de Coordinación para la Planificación de Operaciones basada en el concepto Stroke en Redes de Suministro distribuidas y con alternativas

Tabla 0-9: Costes totales de los 52 periodos analizados de las instancias STP1R75_4, STP1R75_5, STP1R75_6

	Coste total 52 periodos descentralizada-descoordinadas	Coste total Coordinación distribuida	Compensaciones	Coste total 52 periodos Coordinación centralizada
STP1R75_4	9.185.944	8.991.490	-5.207	8.707.967
STP1R75_5	6.679.916	7.531.685	17.615	7.493.654
STP1R75_6	7.692.230	7.995.475	-12.407	8.868.744
Sumatorio	23.558.090	24.518.650		25.070.365

Fuente: Elaboración propia.

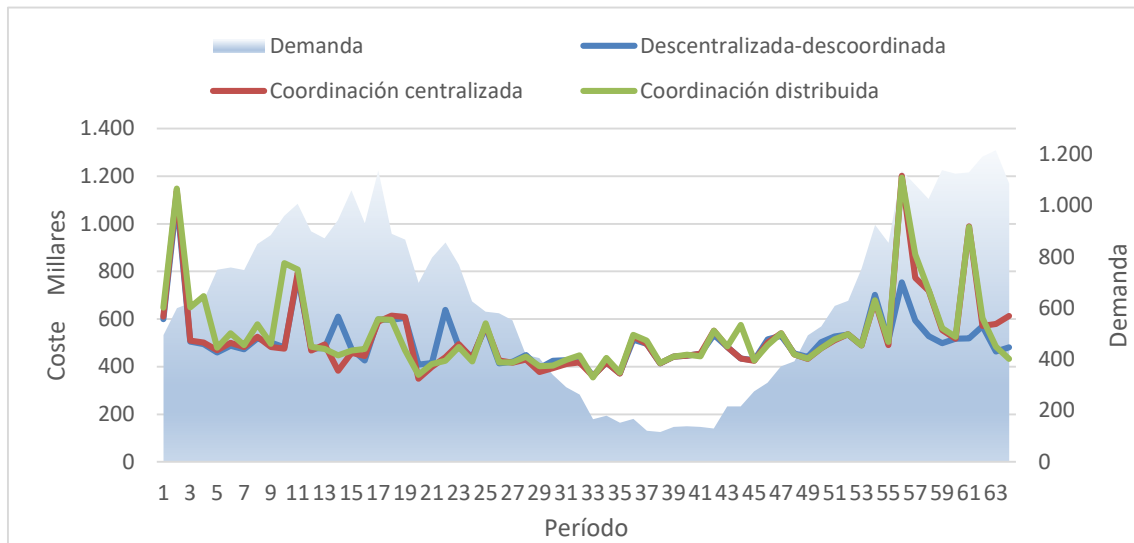
Tabla 0-10: Nivel de servicio de los 52 analizados de las instancias STP1R75_4, STP1R75_5, STP1R75_6

	Nivel de servicio descentralizada-descoordinadas	Nivel de servicio Coordinación distribuida	Nivel de servicio Coordinación centralizada
STP1R75_4	0,98	0,98	0,98
STP1R75_5	0,99	0,99	0,99
STP1R75_6	0,99	0,99	0,99
Promedio		0,99	0,99

Fuente: Elaboración propia.

Se debe recordar que los cálculos son realizados con la heurística del procedimiento de horizontes rodantes, con 8 periodos en cada horizonte de planificación, ejecutándose solo el primer periodo, con incertidumbre en la demanda y con un gap del 1% en el cálculo de cada tramo en el que se planifica. Se pueden observar en la Figura 0-13 las variaciones de la demanda en los 64 tramo en el que se planifica. En la Figura 0-13 se presenta como la demanda acumulada de los 10 productos finales va variando en cada tramo en el que se planifica, implicando variaciones en la planificación, para dar servicio a dichos cambios, pudiéndose realizar cuando se dispone de más capacidad. En la Figura 0-14 se pueden observar cómo los valores de la función objetivo de la planificación con coordinación centralizada de cada tramo en el que se planifica presenta en ciertos tramos en los que se planifica un mayor valor que los valores de la función objetivo obtenidos con la planificación descentralizada-descoordinada. Las variaciones imprevistas en la demanda no permiten en todos los casos que la propuesta de planificación con coordinación centralizada sea la solución más adecuada para el siguiente tramo en el que se planifica.

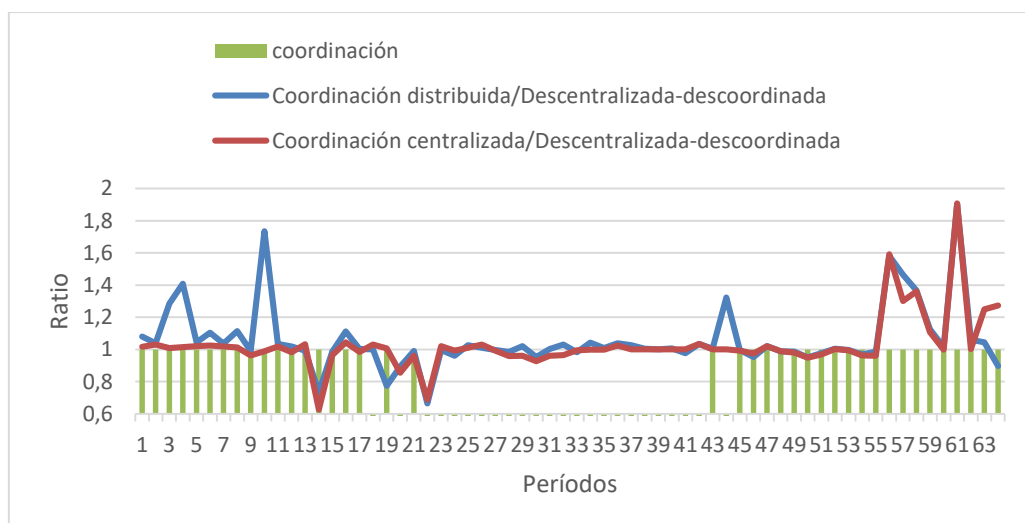
Figura 0-14: Evolución de los costes de la función objetivo en cada tramo en el que se planifica de la instancia STP1R75_5.



La función objetivo es la suma de los costes de los ocho periodos. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 0-15 se puede observar cómo la heurística del procedimiento de horizontes rodantes genera diferentes propuestas de planificación de operaciones respecto de la planificación descentralizada-descoordinada dentro del gap admitido. Se observan diferencias destacables entre los valores que toman las funciones objetivo desde el primer periodo. Las diferentes alternativas que se pueden calcular dentro de la tolerancia admitida, en cada tramo en el que se planifica, pueden generar diferencias importantes en los siguientes tramos en los que se planifica.

Figura 0-15: Relación de costes de la función objetivo de la planificación de operaciones de la instancias STP1R75_5 en cada tramo en el que se planifica respecto de la planificación descentralizada-descoordinada, frente a los tramos en los que se planifica con algún periodo en el que se comparte capacidad.



Fuente: Elaboración propia.