



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

TESIS DOCTORAL

Modelos y métodos para el análisis, diseño y evaluación de
la logística interna de aprovisionamiento a líneas de
montaje con mezcla de modelos en fabricación de
automóviles

PRESENTADA POR AÍDA SÁEZ MÁS

DIRIGIDA POR DR. D. JOSÉ PEDRO GARCÍA SABATER

VALENCIA, ENERO de 2020

AGRADECIMIENTOS

Esta tesis doctoral surge del trabajo de muchos años en los que he dedicado gran parte de mi tiempo y esfuerzo en sacar adelante este proyecto personal. Durante este periodo, he atravesado por diversas fases como la ilusión de empezar un nuevo proyecto, el interés en la investigación, la perseverancia que requiere una tesis en cada momento, la motivación de seguir aprendiendo, el estrés de los plazos y la incertidumbre del futuro entre otras. Sin embargo, por el camino he estado acompañada de diversas personas que han facilitado la consecución de mis objetivos y alentado en cada uno de las fases

En primer lugar, quiero agradecer al Dr. D. José Pedro García Sabater, director de esta tesis, por haberme dado la oportunidad de conocer de primera mano el sector del automóvil a través de diferentes proyectos en los que he podido participar, y gracias a los cuales ha sido posible la realización de esta tesis. Gracias por el tiempo dedicado, tu paciencia, apoyo y también por haberme transmitido tus experiencias e ilusión por el trabajo que realizas día a día.

En segundo lugar, al Dr. D. Ángel Ruiz, por haber creído en mi en momentos difíciles y alentarme a seguir con mi trabajo. Gracias por tu tiempo, comprensión y experiencias compartidas.

Quiero agradecer y dedicar este trabajo a mis padres, Vicente y Adela, por apoyarme durante toda mi vida universitaria y facilitarme el alcanzar cada uno de los objetivos que me he propuesto. Sin su comprensión y ayuda, esta tesis no podría haber salido adelante. También agradecer a mi marido, Rober, por saber escucharme siempre y por todo su ánimo para conseguir mis objetivos profesionales. Gracias por el tiempo libre cedido y tu aliento para seguir trabajando y esforzándome cada día con ilusión y energía.

Agradecer también a todos los compañeros del grupo de investigación ROGLE, Pilar, Julio, Julien, Lourdes, Juan, Cristóbal y Carlos, estoy muy agradecida por vuestra acogida durante todo este tiempo. En especial quiero agradecer a Joan Morant, por toda su ayuda, haber compartido tantas horas de trabajo, conversaciones y risas, que han permitido que el camino sea más sencillo y ameno.

Finalmente, quiero agradecer a los revisores y miembros del tribunal su dedicación, esfuerzo y, sobre todo, sus comentarios.

Valencia, a 20 de enero de 2020

RESUMEN

Esta tesis investiga la logística de aprovisionamiento a una línea de montaje de automóvil, que abarca desde la llegada del material a los muelles hasta su posterior consumo en la línea de montaje, desde un punto de vista de eficiencia y también de seguridad. En las fábricas actuales, donde la cantidad de referencias a gestionar debido a la cada vez mayor personalización del producto final, aumenta la complejidad de gestión en las fábricas. Las decenas de miles de envíos de material a la línea de montaje provocan que la eficiencia, la seguridad y la gestión del tráfico pasen a ser de vital importancia durante la gestión y el diseño de los sistemas de suministro.

En esta tesis se propone una metodología de evaluación de la seguridad y el tráfico del flujo de material durante el suministro de material en plantas de montaje multimodelo. Esta metodología consta de varias etapas e incluye herramientas de evaluación cuantitativa, como es la optimización y la simulación por eventos discretos y también cualitativa, a través de una propuesta de cuestionario de auditoría.

La metodología propuesta surge a partir de la revisión de la literatura sobre la logística interna, la seguridad y el tráfico en planta, y se valida y mejora iterativamente a través de su aplicación a tres casos de estudio reales en diferentes plantas de montaje europeas.

ABSTRACT

This thesis research the supply logistics in an automobile assembly lines, which ranges from the arrival of the material to the reception docks until its subsequent consumption in the assembly line, from an efficiency and safety point of view. In the current factories, the amount of references to manage due to the greater customization of the final product, increases the complexity of the logistics management in the factories. Tens of miles of material deliveries to the final assembly line have an impact in in-plant efficiency, safety and traffic, where their management becomes very important during the supply and its design designs.

This thesis proposes a methodology for evaluating the safety and traffic of the material flow during the material supply in multi-model assembly plants. This methodology consists of several stages and includes quantitative evaluation tools, such as optimization and discrete event simulation and qualitative events, through an audit questionnaire proposal.

The proposed methodology arises from the review of the literature on internal logistics, safety and traffic in-plant, and then is validated and improved iteratively through its application in three real case studies in different European assembly plants.

RESUM

Aquesta tesi investiga la logística d'aprovisionament en una línia de muntatge d'automòbils, que abasta des de l'arribada de l'material als molls fins al seu consum posterior en la línia de muntatge, des d'un punt de vista d'eficiència i també de seguretat. A les fàbriques actuals, on la quantitat de referències a gestionar a causa de la creixent personalització del producte final, augmenta la complexitat de gestió en les fàbriques. Les desenes de millers d'enviaments de material a la línia de muntatge provoquen que l'eficiència, la seguretat i la gestió de l trànsit passen a ser de vital importància durant la gestió i el disseny dels sistemes de subministrament.

En aquesta tesi es proposa una metodologia d'avaluació de la seguretat i el tràfic del flux de material durant el subministrament de material en plantes de muntatge multimodel. Aquesta metodologia consta de diverses etapes i inclou eines d'avaluació quantitativa, com és l'optimització i la simulació per events discrets i també qualitativa, a través d'una proposta de qüestionari d'auditoria.

La metodologia proposada sorgeix de la revisió de la literatura sobre la logística interna, la seguretat i el trànsit a la planta, i es valida i millora iterativament a través de la seua aplicació en tres casos d'estudi real en diferents plantes de muntatge europeu.

Tabla de contenidos

AGRADECIMIENTOS	5
RESUMEN	7
ABSTRACT	8
RESUM	9
Tabla de contenidos	11
Tabla de figuras	17
Tabla de tablas	21
1 INTRODUCCIÓN	25
1.1 Preguntas de investigación	26
1.2 Metodología	27
1.3 Estructura del documento	28
2 CONTEXTO Y REALIDAD INDUSTRIAL DE LOS SISTEMAS DE SUMINISTRO A LÍNEAS DE MONTAJE	31
2.1 Introducción	31
2.2 Evolución y tendencias en la oferta y demanda de automóviles	31
2.3 El movimiento de materiales para el aprovisionamiento a líneas de montaje	35
2.4 Clasificación de las políticas de suministro	39
2.5 Políticas de suministro de material en planta	41
2.5.1 Política de almacenamiento en línea.....	42
2.5.2 Política kanban	44
2.5.3 Política <i>kitting</i>	45
2.5.4 Política de piezas secuenciadas	46
2.5.5 Políticas híbridas y otras consideraciones	47
2.6 Discusión del estado del arte de suministro en el automóvil	50
2.7 Conclusión	54
3 REVISIÓN SISTEMÁTICA DE LA LITERATURA SOBRE LOS SISTEMAS DE APROVISIONAMIENTO A LÍNEAS DE MONTAJE	57
3.1 Introducción	57
3.2 Metodología de búsqueda	58

3.3	Propuesta de clasificación de los artículos revisados.....	60
3.4	Diseño del suministro (DM)	63
3.5	Recepción de material (RP).....	67
3.6	Almacenamiento (ST)	68
3.7	Secuenciado (SC)	70
3.8	Determinación de políticas de suministro (SP).....	75
3.9	Envíos a línea (DL)	81
3.10	Presentación junto a la línea (LP)	93
3.11	Discusión de los resultados de la revisión	94
3.12	Conclusión	104
4	<i>REVISIÓN DE LA LITERATURA SOBRE EL TRÁFICO Y SEGURIDAD EN PLANTA</i>	<i>107</i>
4.1	Introducción.....	107
4.2	Metodología de búsqueda.....	108
4.3	Revisión de la literatura sobre la congestión y el tráfico en planta	109
4.4	Revisión de la literatura sobre la seguridad en entornos de producción	
	118	
4.4.1	Mejorar la disposición del entorno de trabajo	118
4.4.2	Mejorar el estado de los elementos de mantenimiento.....	119
4.4.3	Mejorar el nivel formativo de los trabajadores.....	120
4.4.4	Mejorar el estado del entorno de trabajo	121
4.4.5	Discusión de los resultados	122
4.5	Revisión de la literatura sobre herramientas de simulación para la	
	evaluación cuantitativa de la eficiencia y el tráfico en planta	125
4.5.1	Enfoques de simulación por eventos discretos	125
4.5.2	Enfoques híbridos de simulación y optimización	128
4.6	Discusión de las necesidades para la evaluación del tráfico y seguridad de	
	sistemas de suministro	131
4.7	Conclusión.....	133
5	<i>METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE LA SEGURIDAD Y EL TRÁFICO DE LA LOGÍSTICA</i>	
	<i>INTERNA.....</i>	<i>135</i>
5.1	Introducción.....	135

5.2	Propuesta de herramientas y medibles de evaluación cuantitativa de la seguridad.....	135
5.3	Propuesta de herramientas de evaluación cualitativa de la seguridad	139
5.4	Propuesta de metodología de evaluación de la seguridad y el tráfico de la logística interna	142
5.4.1	Fase 1: Preliminar	144
5.4.2	Fase 2: Diseño.....	145
5.4.3	Fase 3: Estimación cuantitativa	146
5.4.4	Fase 4: Estimación cualitativa.....	148
5.4.5	Fase 5: Evaluación	148
5.4.6	Fase 6: Discusión de los resultados	150
5.5	Conclusión.....	151
6	CASO DE ESTUDIO 1.....	155
6.1	Introducción.....	155
6.2	Descripción del caso de estudio.....	156
6.3	Propuesta de mejora al caso de estudio	157
6.4	Modelado del problema	159
6.5	Modelo programación matemática	161
6.6	Aplicación numérica	166
6.7	Discusión.....	169
6.8	Conclusión.....	172
7	CASO DE ESTUDIO 2.....	175
7.1	Introducción.....	175
7.2	Descripción de la situación actual del suministro de material a una planta de montaje multimodelo	175
7.3	Fase 1: preliminar.....	180
7.3.1	Identificación del problema y del objetivo	180
7.3.2	Recogida de datos	180
7.3.3	Identificación de los flujos y cuantificación estática de estos	180
7.4	Fase 3: Estimación cuantitativa.....	181
7.4.1	Modelar alternativa/as en software de simulación por eventos discretos	181
7.4.2	Definir medibles del tráfico necesarios	183
7.4.3	Identificar zonas a evaluar.....	184
7.4.4	Incluir elementos <i>andon</i> en el modelo y realizar la experimentación	184

7.5	Fase 4: Estimación cualitativa	185
7.5.1	Recorrer la planta, Seleccionar zonas de muestra y Recoger datos de las zonas de muestra	185
7.5.2	Aplicar el cuestionario de la herramienta de auditoría	186
7.6	Fase 5: Evaluación	186
7.6.1	Evaluar los resultados de la estimación cuantitativa.....	186
7.6.2	Evaluar resultados de la estimación cualitativa.....	191
7.6.3	Identificar y documentar puntos críticos.....	191
7.7	Fase 6: Discusión de los resultados y propuestas de mejora futuras....	195
7.7.1	Proponer mejoras a la alternativa final para tratar de reducir el tráfico y aumentar la seguridad	195
7.8	Conclusión.....	196
8	CASO DE ESTUDIO 3.....	199
8.1	Introducción.....	199
8.2	Descripción del caso de estudio	200
8.3	Fase 1: Preliminar.....	204
8.3.1	Identificación del problema y del objetivo	204
8.3.2	Recogida de datos	204
8.3.3	Identificación de los flujos y cuantificación estática de estos	205
8.4	Fase 2: Diseño	206
8.4.1	Diseño preliminar	206
8.4.2	Modelado del problema	210
8.4.3	Modelo de optimización.....	213
8.4.3.1	Ordenación y asignación de las células en columnas	213
8.4.3.2	Mejora local de la asignación.....	215
8.5	Fase 3: Estimación cuantitativa.....	216
8.5.1	Modelar alternativa/as en software de simulación por eventos discretos.....	216
8.5.2	Definir medibles del tráfico necesarios e Identificar zonas a evaluar	218
8.5.3	Incluir elementos <i>andon</i> en el modelo y realizar la experimentación	218
8.6	Fase 4: Estimación cualitativa	219
8.6.1	Recorrer la planta, seleccionar y recoger datos de las zonas de muestra.....	219
8.6.2	Aplicar el cuestionario de la herramienta de auditoría	219
8.7	Fase 5: Evaluación	220
8.7.1	Evaluar los resultados de la estimación cuantitativa.....	220
8.7.2	Evaluar resultados de la estimación cualitativa.....	222
8.7.3	Identificar y documentar puntos críticos.....	223
8.8	Fase 6: Discusión de los resultados	233
8.8.1	Comparar alternativas y validar diseño	233
8.8.2	Proponer mejoras a la alternativa final para tratar de reducir el tráfico y aumentar la seguridad	233

8.8.3	Plantear una posible monitorización del entorno después de una implantación	237
8.9	Conclusión.....	237
9	CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	241
10	PUBLICACIONES FRUTO DE ESTA TESIS	249
11	ANEXOS	251
11.1	Capítulo 5: Simulación en 4 capas.....	251
11.1.1	Enfoque de simulación en 4 capas	251
11.1.2	Arquitectura de simulación en 4 capas	253
11.2	Capítulo 5: Herramienta de auditoría	256
11.2.1	Entorno de trabajo	256
11.2.2	Tareas de trabajo, equipos y políticas.....	265
11.2.3	Seguridad del personal de trabajo	269
11.2.4	Elementos de mantenimiento	271
11.3	Capítulo 7: caso de estudio.....	273
11.3.1	Entorno de trabajo	273
11.3.2	Tareas de trabajo, equipos y políticas.....	280
11.3.3	Seguridad del personal de trabajo	282
11.3.4	Elementos de mantenimiento	284
11.4	Capítulo 8: caso de estudio.....	286
11.4.1	Entorno de trabajo	286
11.4.2	Tareas de trabajo, equipos y políticas.....	292
11.4.3	Seguridad del personal de trabajo	295
11.4.4	Elementos de mantenimiento	296
REFERENCIAS.....		299

Tabla de figuras

Figura 1. Metodología de investigación utilizada.	27
Figura 2. Etapas del proceso de la logística de aprovisionamiento de piezas a líneas de montaje.	35
Figura 3. Punto de secuenciado de las piezas.	37
Figura 4. Subcomponentes de las Políticas de alimentación de piezas.	42
Figura 5. Factores que influyen en el diseño de los sistemas de suministro de material a líneas de montaje.	42
Figura 6. Número de publicaciones por año.	95
Figura 7. Número de publicaciones según la etapa de suministro o nivel de diseño.	95
Figura 8. Número de publicaciones que utilizan cada tipo de herramienta para enfrentar el problema.	98
Figura 9. Flujo del suministro de material dentro de la planta de fabricación de automóviles.	156
Figura 10. Distribución en planta de la fábrica de automóviles con los muelles de recepción (RD), áreas de almacenaje (SA) y puntos de demanda (DP).	157
Figura 11. Flujo de material desde las entregas de los proveedores externos en los muelles hasta los puntos de demanda en las líneas de montaje.	158
Figura 12. Etapas de suministro desde un SA hasta 4 estaciones de consumo (POF) de un DP.	161
Figura 13. Ocupación de los almacenes en las diferentes configuraciones consideradas.	171
Figura 14. <i>Layout</i> de la planta de montaje.	176
Figura 15. Relación de los procesos de la capa lógica del modelo de simulación.	181
Figura 16. Capa visual. Vídeo link	185
Figura 17. Distancia recorrida por hora y vehículo producido desde los puntos de origen, y número de entregas por hora y vehículo producido desde los puntos de origen.	186

Figura 18. Distancia recorrida en metros por vehículo producido en la línea por hora y política de suministro de carros secuenciados (1, 2, 3 o 4 carros por viaje).	187
Figura 19. Congestión media por pasillo adyacente a la línea de montaje para cada política de suministro secuenciado de 1, 2, 3 o 4 carros por viaje.....	188
Figura 20. Congestión máxima por pasillo de la línea de montaje para cada política de suministro secuenciado de 1, 2, 3 o 4 carros por viaje.	189
Figura 21. Congestión media en cada pasillo generada por los diferentes flujos de materiales.....	189
Figura 22. Congestión máxima en cada pasillo generada por los diferentes flujos de materiales.....	189
Figura 23. Intensidad media por hora en cada sección evaluada.	190
Figura 24. Comparación de la media de movimientos por hora en las 7 secciones críticas para entregas secuenciadas de 1, 2, 3 o 4 carros por viaje.	190
Figura 25. Zonas seleccionadas como críticas durante la evaluación del tráfico y seguridad.....	192
Figura 26. Etapas y cantidad de movimientos diarios para suministrar las piezas secuenciadas en la situación inicial y la futura deseada.	201
Figura 27. Representación células de secuenciado.....	202
Figura 28. Etapas de suministro de las piezas secuenciadas.....	204
Figura 29. Representación física de la planta de montaje y de la nueva instalación a diseñar con los distintos flujos de materiales y su recorrido.....	205
Figura 30. Principales propuestas de <i>layout</i> evaluadas.	207
Figura 31. Simplificación del <i>layout</i>	211
Figura 32. Vista del modelo de simulación de la nueva instalación y del resto de la planta de montaje con los elementos <i>andon</i> y sus intervalos de medida.	219
Figura 33. Resultados de la congestión media, máxima e intensidad para la alternativa 1 en la que no se considera la separación de células por operador o punto de destino.....	220
Figura 34. Resultados de la congestión media, máxima e intensidad para la alternativa 2 en la que se separa las células por operador y por punto de destino (trim o chasis).	221

Figura 35. Resultados de la congestión media, máxima e intensidad para la alternativa 3 en la que se separa las células por punto de destino (trim o chasis). 221

Figura 36. Resultados de la congestión media, máxima e intensidad para la alternativa 4 en la que se separa las células por operador..... 222

Figura 37. Puntos críticos identificados a través de la evaluación cuantitativa realizada con la simulación y la evaluación del flujo de materiales inicial..... 223

Figura 38. Conexiones entre las capas del modelo de simulación, usuarios e ingenieros..... 254

Tabla de tablas

Tabla 1. Características para definir los modos de transporte a líneas de montaje con mezcla de modelos.	40
Tabla 2. Resumen de las características de cada política de suministro a línea de montaje.	49
Tabla 3. Palabras clave utilizadas durante la búsqueda de literatura.	58
Tabla 4. Resultados y clasificación de los artículos después de la primera y segunda lectura.....	60
Tabla 5. Clasificación de los artículos dentro de cada una de las etapas de suministro.	61
Tabla 6 Codificación de los artículos considerados positivos durante su revisión. .	62
Tabla 7. Resumen de los trabajos sobre diseño de suministro.	66
Tabla 8. Resumen de los trabajos sobre almacenamiento.	69
Tabla 9. Resumen de los trabajos sobre áreas de secuenciado.	74
Tabla 10. Resumen de los trabajos sobre la determinación de las políticas de suministro.....	80
Tabla 11. Resumen de los trabajos sobre las entregas a línea.....	90
Tabla 12. Resumen de los trabajos sobre la presentación en línea. Fuente: Elaboración propia.....	94
Tabla 13 Número de publicaciones según la clasificación del suministro propuesta.	97
Tabla 14. Número de publicaciones por revista.	99
Tabla 15. Número de artículos correspondientes a cada una de las etapas de la clasificación propuesta para cada una de las revistas.	100
Tabla 16 Comparativa de trabajos sobre el tráfico en planta.	114
Tabla 17 Resumen de los trabajos sobre seguridad en planta asociada al movimiento de elementos de manutención.....	123
Tabla 18. Concepto de congestión del tráfico para diferentes autores.	132
Tabla 19. Propuesta de medibles a utilizar para cuantificar el tráfico en planta. .	136
Tabla 24. Fases a seguir al aplicar la metodología propuesta.....	143

Tabla 25. Tareas a realizar durante la primera fase de la metodología.	144
Tabla 26. Tareas a realizar durante la segunda fase de la metodología.	145
Tabla 27. Tareas a realizar durante la tercera fase de la metodología.	146
Tabla 28. Tareas a realizar durante la cuarta fase de la metodología.....	148
Tabla 29. Tareas a realizar durante la quinta fase de la metodología.	149
Tabla 30. Tabla de evaluación de los puntos críticos en la fase de evaluación de la metodología.	149
Tabla 31. Tareas a realizar durante la sexta fase de la metodología.	150
Tabla 32. Capacidad de los tipos de flotas de trenes según el área de trabajo y el flujo de material.	168
Tabla 33. Tiempo total de transporte para las diferentes configuraciones.	169
Tabla 34. Resumen de los diferentes flujos de materiales y políticas de suministro a las líneas de montaje.	178
Tabla 35. Medibles propuestos para la evaluación cuantitativa del flujo de material.	183
Tabla 36. Volumen de carretillas que acceden diariamente a la planta por cada uno de los accesos.	187
Tabla 37. Tabla resumen del punto crítico A.	192
Tabla 38. Tabla resumen del punto crítico B.	193
Tabla 39. Tabla resumen del punto crítico C.....	194
Tabla 40. Recomendaciones propuestas para reducir el tráfico y mejorar la seguridad en el punto crítico A.	195
Tabla 41. Recomendaciones propuestas para reducir el tráfico y mejorar la seguridad en el punto crítico B.....	195
Tabla 42. Recomendaciones propuestas para reducir el tráfico y mejorar la seguridad en el punto crítico C.....	196
Tabla 43. Estimación estática de los movimientos para cada flujo de materiales.	206
Tabla 44. Cantidad de movimientos generados por cada tipo de flujo en el punto crítico A.....	224

Tabla 45. Cantidad de movimientos generados por cada tipo de flujo en el punto crítico B.....	225
Tabla 46. Cantidad de movimientos generados por cada tipo de flujo en el punto crítico C.....	226
Tabla 47. Cantidad de movimientos generados por cada tipo de flujo en el punto crítico D.....	226
Tabla 48. Cantidad de movimientos generados por cada tipo de flujo en el punto crítico E.....	227
Tabla 49. Cantidad de movimientos generados por cada tipo de flujo en el punto crítico F.....	228
Tabla 50. Cantidad de movimientos generados por cada tipo de flujo en el punto crítico G y H.....	229
Tabla 51. Cantidad de movimientos generados por cada tipo de flujo en el punto crítico I.....	230
Tabla 52. Cantidad de movimientos generados por cada tipo de flujo en el punto crítico J.....	231
Tabla 53. Cantidad de movimientos generados por cada tipo de flujo en el punto crítico K.....	232
Tabla 54. Recomendaciones para el punto crítico A.....	234
Tabla 55. Recomendaciones para el punto crítico B.....	234
Tabla 56. Recomendaciones para el punto crítico C.....	234
Tabla 57. Recomendaciones para el punto crítico D.....	235
Tabla 58. Recomendaciones para el punto crítico E.....	235
Tabla 59. Recomendaciones para el punto crítico F.....	235
Tabla 60. Recomendaciones para el punto crítico G-H.....	235
Tabla 61. Recomendaciones para el punto crítico I.....	236
Tabla 62. Recomendaciones para el punto crítico J.....	236
Tabla 63. Recomendaciones para el punto crítico K.....	236
Tabla 20. Preguntas de auditoría relacionadas con el entorno de trabajo.....	256

Tabla 21. Preguntas de auditoría relacionadas con Tareas de trabajo, equipos y políticas.	265
Tabla 22. Preguntas de auditoría relacionadas con la seguridad del personal de trabajo.	269
Tabla 23. Preguntas de auditoría relacionadas con los elementos de manutención.	271
Tabla 64. Preguntas de auditoría relacionadas con el Entorno de trabajo del caso de estudio 2.	273
Tabla 65. Preguntas de auditoría relacionadas con Tareas de trabajo, equipos y políticas del caso de estudio 2.	280
Tabla 66. Preguntas de auditoría relacionadas con el Personal de trabajo del caso de estudio 2.	282
Tabla 67. Preguntas de auditoría relacionadas con los elementos de manutención del caso de estudio 2.	284
Tabla 68. Preguntas de auditoría relacionadas con el Entorno de trabajo del caso de estudio 3.	286
Tabla 69. Preguntas de auditoría relacionadas con Tareas de trabajo, equipos y políticas del caso de estudio 3.	292
Tabla 70. Preguntas de auditoría relacionadas con el Personal de trabajo del caso de estudio 3.	295
Tabla 71. Preguntas de auditoría relacionadas con los elementos de manutención del caso de estudio 3.	296

1 INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, el perfil de los consumidores a nivel mundial ha evolucionado. En particular, en la industria del automóvil, los clientes buscan poder personalizar una mayor cantidad de los componentes de sus vehículos tanto de los acabados, del motor o incluir algunos de los servicios extras disponibles.

Hasta hace unas décadas, las pocas opciones de personalización que se ofrecían a los consumidores en la selección de coches era la selección del color, el número de puertas, el tipo de motor y algunos extras como podía ser el aire acondicionado o la dirección asistida.

La cada vez mayor implicación del cliente en el diseño del producto final supone un cambio en el paradigma de consumo de vehículos conocido décadas atrás, la cual tiene un efecto en la manera de concebir la producción en las fábricas actuales, donde se ha de poder personalizar a mínimo coste cada uno de los vehículos en la línea de montaje final disponible.

La personalización conlleva un aumento de la complejidad de la logística en las plantas de montaje, ya que, al aumentar la variedad de opciones disponibles para los clientes, los componentes que las hacen posibles deben estar disponibles en la fábrica. Esta gestión de piezas supone un reto para los proveedores, para los fabricantes y para los actores logísticos (internos y externos) que han de manejarlo.

Por un lado, es necesario disponer de un mayor espacio de almacenamiento para el stock (posiblemente inferior) de cada una de las variantes. También existe una mayor dificultad de manejo y gestión del material para asegurar su disponibilidad en el momento preciso junto a la línea de montaje. El espacio junto a la línea de montaje en general es limitado, y el crecimiento en la complejidad del modelo lo ha hecho escaso, de tal modo que actualmente no permite albergar toda la variedad de referencias de componentes a ensamblar en cada estación.

Realizar cambios en el diseño de la línea para poder albergar todas las referencias, no suele ser posible. De este modo, se requiere cambiar el modo de suministro de material originalmente considerado, en el que palés completos se almacenan junto a la línea y se reponen desde almacenes centrales cuando se alcanza un determinado punto de pedido.

Estos nuevos modos de suministro de piezas permiten extraer de la línea de montaje operaciones como son el almacenamiento, manipulación y selección, y localizarlas

en otras instalaciones próximas a la línea, desde donde se enviarán piezas y submontajes a la línea de montaje según se vayan requiriendo.

Dadas las circunstancias actuales, las plantas de montaje requieren de una mayor cantidad de instalaciones disponibles para realizar estas operaciones y desde las que existirá un flujo continuo de material para garantizar su disponibilidad en la línea, desplazando lejos de la línea las actividades que antes se realizaban allí.

1.1 Preguntas de investigación

El objetivo de esta tesis es investigar acerca de los cambios que experimenta la logística interna a líneas de montaje con razón de la gran variedad de piezas a gestionar; las cuales pueden generar situaciones de tráfico en determinados puntos de la planta por la que conviven trabajadores, diversos elementos de manutención en tránsito o parados. El tráfico en planta puede repercutir negativamente en la eficiencia y seguridad de planta, derivando tanto en posibles retrasos en las entregas de material como en accidentes internos. De este modo, en esta tesis se busca dar respuesta a este problema tratando de conocer, si existen, los métodos que permiten evaluar la logística interna desde un punto de vista de tráfico y seguridad, y conocer cómo evitarlos o prevenirlos.

Este objetivo se podría resumir en las siguientes preguntas de investigación:

- ¿Cuál es el proceso de suministro interno de material a las líneas de montaje actuales?
- ¿Existe una preocupación real en fábricas y en la literatura sobre el exceso de movimiento de material junto a la línea de montaje?
- ¿Qué métodos y herramientas propone la literatura para estimar la eficiencia y el tráfico en plantas de montaje?
- ¿Qué indicadores se utilizan para estimar la eficiencia y el tráfico en plantas de montaje?

Los objetivos específicos de esta tesis serían los siguientes:

- Presentar el proceso de la logística interna de suministro a líneas de montaje con las diferentes etapas y actividades de cada una de ellas.
- Recopilar las políticas de suministro utilizadas actualmente para suministrar líneas de montaje, qué características las definen y cuando se recomienda el uso de cada una de ellas.

- Realizar una revisión sistemática de la literatura sobre el proceso de la logística interna a líneas de montaje en el automóvil y proponiendo una taxonomía para los artículos e identificando los principales objetivos, herramientas y problema de decisión.
- Investigar sobre el tráfico y seguridad en planta mediante una revisión de la literatura existente recopilando los diferentes objetivos perseguidos, metodologías, herramientas utilizadas y medibles propuestos entre otros.
- Proponer una metodología de evaluación del tráfico y seguridad de la logística interna de aprovisionamiento a líneas de montaje.
- Aplicación y validación de la metodología propuesta en el estudio de 3 casos reales de suministro a líneas de montaje de automóviles.

1.2 Metodología

La metodología de trabajo de esta tesis está basada en el paradigma denominado *action research*, donde se busca una transformación a través de realizar simultáneamente acciones de mejora e investigación. Para ello, tal y como se muestra en la Figura 1, la metodología de trabajo de esta tesis comienza con la observación de la realidad industrial en relación a la logística en fábricas de montaje de automóviles multimodelo y con la correspondiente revisión de la literatura. De la observación y la revisión, se espera identificar los principales problemas a los que se enfrentan diariamente en las fábricas y cómo ha respondido ante ello la literatura. Se busca recabar herramientas y metodologías apropiadas para evaluar la logística en planta y el tráfico asociado a este.



Fuente: Elaboración propia.

Una vez investigada la seguridad y el tráfico en planta, se propondrá una metodología y herramientas de trabajo que se validará durante el estudio de casos reales. Los resultados de su aplicación servirán para retroalimentar los datos recogidos durante la observación y mejorar así, de manera iterativa, la metodología propuesta. De este modo, la metodología de evaluación presentada en esta tesis corresponde con la versión final, la cual será la aplicada y presentada en esta tesis para el estudio de diversos casos reales.

1.3 Estructura del documento

La tesis está organizada en diez capítulos incluyendo el presente de introducción y repartidos del siguiente modo: El segundo capítulo contextualiza la logística interna a líneas de montaje. El tercer y cuarto capítulo presentan dos revisiones de literatura, una sobre la logística interna a líneas de montaje y a continuación, otra sobre el tráfico y seguridad en planta. El capítulo cinco contiene la propuesta de metodología fruto de esta tesis. Los capítulos del sexto al octavo son los estudios de casos reales. El noveno capítulo contiene las principales conclusiones de esta tesis y las líneas futuras de investigación. El décimo capítulo presenta las publicaciones fruto de esta tesis.

El capítulo 2 tiene como objetivo presentar al lector la situación actual de la logística interna a líneas de montaje y conocer algunas de las tendencias que se esperan en el sector durante los próximos. Para ello se analizan algunos informes que recogen las principales tendencias para los próximos 10 años. También se presenta el proceso de la logística de suministro actualmente utilizado en el sector del automóvil. También se incluyen dos apartados con una descripción detallada de las diversas políticas de suministro a línea de montaje y las principales características de cada una de ellas.

El capítulo 3 contiene una revisión sistemática de la literatura sobre el aprovisionamiento a líneas de montaje en el automóvil, cuyo objetivo es conocer cómo se ha tratado en la literatura el aumento de la complejidad en cuanto al número de variantes, qué problemáticas son las más trabajadas y qué dicen los autores respecto a los posibles problemas resultantes del exceso de envíos y movimiento de elementos de manutención junto a la línea. El capítulo está organizado siguiendo cada una de las decisiones requeridas en cada etapa de la logística interna, la cual permitirá al lector conocer mejor el proceso, así como clasificar cada uno de los artículos revisados.

El capítulo 4 surge de la necesidad de profundizar en el tráfico y seguridad en plantas de montaje debido al movimiento de elementos de manutención móviles. El objetivo de este capítulo es revisar la literatura del movimiento de estos elementos, y conocer cómo el tráfico puede afectar a la eficiencia y seguridad del suministro. Este capítulo también recoge una breve revisión de las principales herramientas propuestas en la literatura para este ámbito, como es la simulación por eventos discretos y algunos enfoques de modelado. Se espera poder utilizar este capítulo como punto de partida para elaborar una propuesta de metodología para evaluar el movimiento de material de los sistemas de aprovisionamiento.

El capítulo 5 presenta una metodología de evaluación de la seguridad y el tráfico en planta asociado a los elementos de manutención durante el suministro. Además, cabe destacar que esta metodología es la versión final propuesta después de su aplicación iterativa en varios casos reales que se presentarán en los próximos capítulos y que, por lo tanto, se ha ido puliendo en las sucesivas iteraciones, a la luz de la experiencia y de la teoría. La metodología consta de 6 fases con varias tareas intermedias.

El capítulo 6 contiene el primero de los estudios de casos reales. Presenta un caso sobre el rediseño de la logística interna de una fábrica de montaje de automóviles europea mono modelo. Este caso tiene la particularidad de ser un caso estratégico en el que se aprecian diversos factores a considerar a la hora de realizar un diseño y evaluación macro de la logística interna. En concreto, el caso se refiere a la gestión de los componentes y el flujo de piezas para alimentar las diferentes estaciones de trabajo de las líneas de producción.

El capítulo 7 presenta un caso de estudio sobre el aprovisionamiento a líneas de montaje con mezcla de modelos de una planta que experimenta más de 14.000 entregas de material al día. Dada la cantidad de movimientos junto a la línea, se propone una evaluación del flujo de material mediante la herramienta de evaluación que se propondrá en el capítulo 5. Se espera que los resultados proporcionen información relevante para conocer los problemas en el interior de la nueva instalación y poder plantear acciones de mejora.

El capítulo 8 presenta un problema de diseño de instalaciones en el que se quieren localizar varias células de secuenciado a una instalación junto a una planta de montaje final de automóviles. El problema principal que se aborda se relaciona con la seguridad de todas las actividades logísticas de entrada y salida involucradas en el proceso y que requieren del movimiento de diversos elementos de manutención

y, en especial, de carretillas elevadoras y su convivencia con el flujo de operarios. Para ello, se propone aplicar la metodología de evaluación presentada en el capítulo 5, en la que se evalúa cuantitativa y cualitativamente el flujo de material del suministro a la línea de montaje

El capítulo 9 presenta un breve resumen de esta tesis y las principales conclusiones. También se propondrán futuras líneas de trabajo e investigación para seguir profundizando sobre este tema en cuestión. El capítulo 10 recoge las principales publicaciones fruto de esta tesis. Finalmente, se incluyen las referencias bibliográficas citadas a lo largo de la tesis, así como el material trabajado durante el desarrollo de esta tesis pero que, por su extensión y tipo de contenido dentro de cada uno de los capítulos, se ha decidido incluir a modo de anexos a la lectura.

2 CONTEXTO Y REALIDAD INDUSTRIAL DE LOS SISTEMAS DE SUMINISTRO A LÍNEAS DE MONTAJE

2.1 Introducción

El presente capítulo expone una visión de la realidad industrial sobre los sistemas de suministro a líneas de montaje en el sector del automóvil. El principal objetivo es entender la situación actual de la logística del automóvil y conocer algunas de las tendencias que se esperan en el sector durante los próximos años, las cuales podrían influir en la manera de concebir actualmente la logística en las fábricas.

Para ello se van a analizar algunos informes que presentan las principales preocupaciones y tendencias de los próximos 10 años. Para entender la logística interna que actualmente tiene lugar en el automóvil, se va a dedicar un apartado a la descripción detallada del proceso de suministro desde la recepción del material en los muelles hasta su correspondiente entrega a las estaciones de la línea de montaje final para su consumo.

El suministro a línea se lleva a cabo utilizando diversas políticas de aprovisionamiento, las cuales se aplicarán según sean las necesidades y limitaciones de la planta y las especificaciones de las referencias en cuestión. Cada una de estas políticas se van a recoger en un apartado en el que se especifica su funcionamiento, requerimientos y principales ventajas de uso. Previamente, para poder entenderlas, se clasificarán cada una de las características que definen los diversos modos de suministro.

El resto del capítulo se estructura como sigue. En primer lugar, se presentan las principales tendencias que se esperan en la fabricación de automóviles. A continuación, se describe el proceso completo de suministro a líneas de montaje. Después, se clasifican las características de las políticas de suministro y se presentan cada una de ellas. Finalmente se realiza una discusión de la problemática actual según todo lo visto en el capítulo y se completa con las conclusiones.

2.2 Evolución y tendencias en la oferta y demanda de automóviles

La industria del automóvil constituye, hasta el momento, uno de los sectores económicos más importantes a nivel mundial y engloba diferentes campos como son el diseño, el desarrollo, la fabricación y la comercialización de automóviles. Cada una de estos campos lleva asociado una gran cantidad de proveedores, tanto de productos como de servicios, y de personal involucrado (Stoan, 2018).

Diversos estudios han analizado las tendencias de la industria del automóvil y el comportamiento de sus consumidores. Aunque se espera un ligero incremento en la demanda durante los próximos años, hay una serie de aspectos que pueden cambiar el paradigma de la industria automovilística hasta ahora conocido. Entre estas tendencias se encuentra el que los coches del futuro sean eléctricos, autónomos, compartidos y con una actualización anual de su diseño y funciones (PwC, 2018).

Según Meyer (2016) y PwC (2017), en el futuro se espera que la movilidad sea mucho más sencilla y flexible para los usuarios, además de que los coches se compartirán y utilizarán bajo demanda. Actualmente el rango de uso de los automóviles se encuentra en el 1.3 personas por vehículo, al compartir los vehículos, se espera que estos se utilicen con mayor intensidad, es decir, aumentando la ocupación durante su uso. Este mayor uso de los vehículos por parte de los usuarios provocará que sea necesario reemplazarlos con mayor asiduidad debido al desgaste.

Para el año 2030, según los estudios anteriores, se espera que en Europa la cantidad de automóviles disminuya de 280 a 200 millones. Sin embargo, la producción como tal no tiene por qué caer drásticamente en los próximos años debido a la actualización de los modelos con los últimos cambios en innovación y a la necesidad de reposición de los consumidores. Por ejemplo, en 2030, se espera que el 40% de los vehículos se hayan reemplazado por vehículos autónomos (PwC, 2018).

Dado el mayor uso que se le harán a los vehículos y, el hecho de que el perfil de consumidor actual es cada vez más exigente, será necesaria la reposición de los vehículos compartidos o de alquiler con una mayor frecuencia. Los fabricantes esperan introducir actualizaciones de hardware y software anualmente (PwC, 2018).

La demanda global de productos y en particular la industria del automóvil, se caracteriza por el incremento de la personalización del producto (Bhamu y Sangwan, 2014). Alford, Sackett, y Nelder (2000) presentan como funciona la personalización en masa en el automóvil, donde destacan tres tipos de personalización del producto: (1) forma, (2) opcional y (3) personalización. El primero, forma, corresponde con la personalización del producto según la venta al cliente. Los distribuidores pueden ofrecer paquetes de servicios como garantía, seguros o financiación entre otros. El segundo tipo, opcional, permite al cliente elegir su vehículo de entre un conjunto cada vez mayor de opciones en las que el diseño no se ve afectado. El cliente se integra en el proceso de producción, ya que los vehículos se van ensamblando de acuerdo a sus requerimientos. El tercer tipo, personalización, está disponible para

un volumen bajo de demanda y con un coste superior al estándar. Los vehículos se diseñan para cubrir un determinado requerimiento de mercado. Un ejemplo podría ser los vehículos adaptados para flotas de personas.

Battini, Boysen, y Emde (2013) identificaron una serie de tendencias que integra la personalización en masa en la producción de automóviles, que como son (1) la posibilidad de personalización de los productos que permiten algunos fabricantes hasta poco tiempo antes de la producción, lo que genera distorsión en la logística de suministro y en los proveedores, (2) las líneas multimodelo, que implican mayor complejidad en la producción y el equilibrado de la líneas, y (3) las entregas *just-in-time* (JIT) o *just-in-sequence* (JIS), que incrementan la relevancia de la logística interna y requieren de una mayor planificación y confianza en las operaciones logísticas.

De acuerdo con Kang (2001), un coche medio contiene alrededor de 20,000 piezas que se deben gestionar antes, durante y después de la producción. Además de ello, debido a la globalización y a las decisiones estratégicas de los fabricantes de automóviles, cada una de esas piezas se puede estar fabricando en instalaciones en el parque de proveedores más próximo o a miles de kilómetros, y compartido o no con otros modelos.

Las tendencias en el mercado anteriormente comentadas, originarán cambios en la manera de concebir la producción en las fábricas actuales:

- La tendencia hacia un uso compartido y un mayor uso conllevará una disminución en la demanda y por tanto en la producción. Esto provocará que el exceso de capacidad de producción en algunos fabricantes los lleve a cuestionarse el cierre de algunas de las plantas y unificar la producción en aquellas más flexibles y de mayor capacidad para reducir costes. El reunir varios modelos para producirlos en una sola fábrica recibe el nombre de fabricación multimodelo.
- Las actualizaciones cada vez más frecuentes requerirán de lanzamientos de nuevos modelos con mayor asiduidad. Las fábricas deberán ser flexibles para poder introducir nuevos lanzamientos en un tiempo menor a los lanzamientos actuales, que se dan cada 3 años aproximadamente.

Con todo esto, la tendencia de la producción de automóviles se espera que sea la fabricación multimodelo, con fábricas capaces de aprovechar el exceso de capacidad surgida de la evolución natural del mercado. También, requerirán ser flexibles para poder acoger más de un lanzamiento al año. Finalmente, si a la complejidad natural

de este tipo de producto en cuanto al número de componentes y variantes de un único modelo, se le añade el hecho de fabricar varios modelos conjuntamente, la cantidad de piezas a manejar en una misma fábrica y la complejidad de la logística se multiplica. Esto supone un efecto en la gestión logística interna de la fábrica, con diferentes modos de llegada, gestión interna, almacenaje y entregas a línea.

Como consecuencia de la personalización del producto y de las líneas multimodelo, surge otra preocupación en las fábricas que es la falta de espacio junto a la línea de montaje. En efecto, las líneas se diseñan normalmente pensando en la eficacia de las operaciones de ensamblaje, sin considerar las necesidades de espacio para albergar todo el inventario para cada una de las variantes para un único modelo (Alnahhal y Noche, 2013). Esto conlleva la necesidad de sacar el almacenamiento fuera de la planta de ensamblaje y localizar el almacenaje y demás actividades de manipulación de materiales, como la selección u la ordenación de componentes, en otras instalaciones (Saez-Mas, Garcia-Sabater, Garcia-Sabater, et al., 2018).

Si bien estas estrategias liberan espacio en las líneas, aumentan considerablemente el tráfico logístico desde los almacenes o puestos de secuenciación externos hacia los puestos de trabajo de las líneas. Además, extraer las actividades de manipulación, también provoca tener que priorizar el uso de los espacios de los almacenes alejados, ya que los espacios cercanos se van a tener que utilizar para los trabajos de preparación o secuenciado. Este es un problema que antes no se daba, ya que los espacios de preparación eran escasos o incluso no eran necesarios, y por ello, la mayor parte del espacio junto a la línea servía de almacenes.

Así pues, la estructura y las necesidades logísticas han evolucionado considerablemente. Al localizar las piezas alejadas de la línea, se requerirá de un suministro continuo de material desde los almacenes descentralizados y/o células de trabajo previas hasta las estaciones de montaje final para satisfacer las necesidades de alimentación de la línea (Caputo, Pelagagge, & Salini, 2015c).

Por otra parte, uno de los mayores retos en la producción de automóviles es asegurar que las líneas de montaje disponen del material necesario para su correcto funcionamiento. Boysen, Emde, Hoeck, y Kauderer (2015) identificaron cuatro opciones posibles ante la ausencia de uno de los componentes. Si hay margen de tiempo, una primera opción sería la de (1) resecuenciar la salida de los coches desde el almacén para evitar la producción de aquellos modelos para los que el material no está disponible. Esta opción supone problemas en la logística debido a los cambios de última hora, y tendrá un impacto en el trabajo de los proveedores y en

los almacenes internos. Otra opción sería (2) el envío exprés de las piezas a través de vehículos alternativos (helicóptero) en el caso de que fuera posible. Según el tipo de componente, se podría (3) omitir la pieza durante el ensamblaje y retrabajar el vehículo al final de la línea. Por último, la peor opción sería (4) parar la línea, ya que supone cientos de trabajadores desocupados y serias pérdidas económicas.

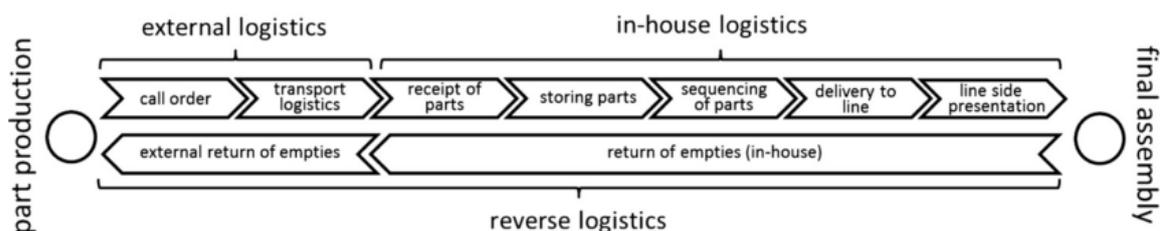
En definitiva, se constata una evolución en las preocupaciones de los fabricantes de automóviles que se aleja del diseño de la línea o su capacidad, sino en la gestión de su logística interna. Debido a todo lo anterior, los requerimientos de variedad de productos suponen un reto enorme para la gestión de la logística interna de suministro a líneas de montaje con mezcla de modelos (MMAL), y además, es una tarea de vital importancia dada su relación con la línea de montaje, que debe funcionar correcta y eficientemente (Emde y Boysen, 2012).

2.3 El movimiento de materiales para el aprovisionamiento a líneas de montaje

Para garantizar el aprovisionamiento a líneas de montaje en la industria del automóvil es necesaria una buena gestión de la logística tanto externa como interna. La logística externa incluye todas las actividades de manejo y gestión de material desde que se generan las peticiones a los proveedores hasta que se entregan en las instalaciones de la fábrica. La logística interna, objeto de esta tesis y en la que se centrarán los posteriores capítulos, considera todas aquellas actividades realizadas desde la recepción del material en la entrada de la fábrica hasta su posterior entrega y consumo en las estaciones de montaje.

Boysen et al. (2015) identificaron 6 etapas principales de las operaciones logísticas internas para el suministro a líneas de montaje de automóviles, como son (1) la recepción, (2) el almacenamiento, (3) el secuenciado, (4) el envío a línea, (5) la presentación junto a la línea y (6) retorno de vacíos (Figura 2), las cuales se van a usar como un marco de referencia a lo largo de este trabajo.

Figura 2. Etapas del proceso de la logística de aprovisionamiento de piezas a líneas de montaje.



Fuente: Boysen et al. (2015).

La mayoría de fábricas de automóviles modernas cuentan con un parque más o menos grande de proveedores próximos sus instalaciones. Si cuentan con espacio suficiente dentro de sus instalaciones, los proveedores se pueden llegar a ubicar dentro de las fábricas. Los proveedores realizan actividades de fabricación, operaciones o secuenciado de componentes o subconjuntos y envían los componentes a la fábrica de montaje.

La recepción de piezas dentro de las fábricas se puede dar de manera:

- aérea, suministro de piezas grandes a través de *conveyors* aéreos. Algunas de las partes a entregar que tienen un gran volumen físico, como las consolas, asientos o paneles de puertas, se suministran en secuencia, *just-in-sequence*, a través de un *conveyor* aéreo desde los proveedores hasta la estación de la línea donde se han de ensamblar al vehículo.
- terrestre, suministro de piezas a través de los muelles de recepción. Normalmente lo hacen en formato palé o cajas paletizadas, aunque también pueden llegar en un formato superior al palé de tipo especial.

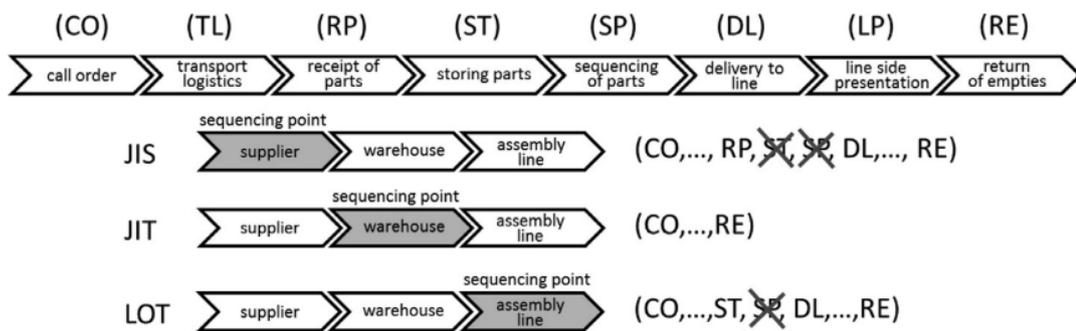
Los proveedores están obligados a entregar dentro de unas ventanas horarias de entrega, así como en unos muelles generalmente ya preestablecidos. Esta asignación se realiza previamente de acuerdo al diseño de *layout*, los puntos de consumo y la asignación de zonas de almacenaje con el objetivo de coordinar el flujo de material dentro de la fábrica. Una vez en el muelle, se realizan los trámites de gestión y se receptiona el material, normalmente mediante carretillas elevadoras.

Una vez receptionadas las piezas estas seguirán un trayecto que dependerá de donde se encuentre su punto de secuencia de acuerdo a la Figura 3:

- LOT - Almacenar y enviar a línea. El material se recibe paletizado, se almacena y se envía a la línea en la misma unidad de carga. Será el propio operario de la estación el encargado de realizar la selección del producto según la secuencia de montaje. Puede haber almacenes reguladores en las diferentes etapas.
- JIT - Almacenar, secuenciar y enviar a línea en pequeñas cantidades. Son piezas que llegan paletizadas a los muelles, se almacenan y se secuencian en células previas a la línea para hacer entregas *just-in-time* a esta. En la línea, el operario de la línea únicamente tiene que seleccionar el siguiente producto del contenedor.

- JIS - Enviar a línea. El material recepcionado en el muelle se suele entregar mediante entregas *just-in-sequence* (JIS) terrestre. Las entregas JIS contienen submontajes secuenciados en carros que vienen desde el proveedor y que están listos para ser entregados a línea, de forma que no es necesario almacenarlos como tal. Sí puede ser necesario mantenerlas durante un lapso de tiempo en las instalaciones hasta que se solicita en la línea. Las piezas que utilizan este sistema suelen ser de gran tamaño como pueden ser los asientos o el panel de control, y llegan por *conveyor* aéreo.

Figura 3. Punto de secuenciado de las piezas.



Fuente: Boysen et al. (2015).

Para los casos LOT y JIT, el material se ha de transportar a los almacenes internos. Para ello, según la distancia a la que se encuentre, el tiempo disponible y la política de recepción/entrega elegida y el transporte se hará de diferentes modos. Por ejemplo, las carretillas elevadoras de los muelles pueden:

- descargar los palés en una zona de descarga.
- descargar y transportar directamente los palés hasta los almacenes.
- descargar sobre plataformas de remolcadoras encargadas de realizar el transporte entre muelles y almacenes.

Con la última opción se incrementa la cantidad de unidades de carga por viaje realizado y se reducen las distancias recorridas, pero el tiempo de suministro se ve incrementado. Esta opción suele ser apropiada en aquellos casos en los que el punto de entrega o almacén se encuentra alejado del muelle y no existe una restricción de tiempo de entrega como tal. Dentro de las instalaciones de fabricantes de automóviles se suele tener un stock disponible correspondiente a dos días de producción (de manera general).

Una vez entregadas las piezas en el almacén, estas se almacenen temporalmente hasta su llamada. Las peticiones se pueden generar:

- en la línea de montaje.
- en células de trabajo previas a la línea.

En el almacén, una flota de carretilleros se encarga de gestionar todas las órdenes de material, yendo a las estanterías a por los palés y preparándolo en una zona de selección. Del mismo modo que ocurre en los muelles, puede ser que las estaciones se encuentren muy próximas al punto de almacenamiento o bien a cientos de metros. Según el caso ante el que se esté se deberá establecer si el producto se entrega directamente en un almacén central o un almacén descentralizado, o en ambos sitios. En ambos casos la petición de material se puede generar de dos maneras:

- *Call order*. Cuando la cantidad disponible en los palés llega a un mínimo establecido, el operario aprieta el botón de pedido que genera una orden en el sistema.
- *Autocall*. También puede ser que el mismo sistema de manejo de materiales vaya descontando la cantidad de componentes utilizados y calcule los restantes disponibles en las estaciones y, por consiguiente, lance las peticiones de material directamente.

El efecto multimodelo exige líneas más largas y con más estaciones para poder incorporar los diferentes modelos y variantes a los tiempos de producción y también por el espacio en línea disponible. Una estación puede medir alrededor de 8 metros de longitud. Dado este espacio y la cantidad de variantes necesarias de cada componente en cada estación, se tendrá que ajustar y definir los diferentes modos de suministro.

Según las características de los componentes, la variedad, el consumo y su punto de secuenciado, las piezas se entregarán desde el almacén directamente a la línea de montaje (LOT) o desde células de trabajo o supermercados (JIT) previas a la línea de montaje.

Estas células o supermercados evitan tener una amplia gama de productos o de cantidad de producto junto a la línea. En estas instalaciones se suele disponer de una zona de selección productos y se realizan operaciones de montaje, secuenciado, preparación de kits, llenado de carros o varias actividades simultáneamente. En el

siguiente apartado se analizará con más detalle las diferentes políticas de suministro a línea.

Desde las estaciones anteriores o desde los almacenes, se realizan las entregas a línea. Dada la tendencia multimodelo y multivariante de producción y la escasez de espacio junto a la línea, aparecen diversos modos de suministro que lo gestionen, como son las entregas secuenciadas, los kits de piezas, el *conveyor*, las rutas kanban etc. Según las características del producto y su ubicación, es importante decidir un modo de suministro que trate de optimizar los recursos disponibles y garantice, ante todo, las entregas sin retrasos. El medio de manutención más común para realizar las entregas es la carretilla remolcadora en sus diferentes versiones, carro/estantería multiproducto, aunque también se pueden utilizar carretillas elevadoras, *conveyor* o cintas transportadoras entre otros.

Finalmente, todos los contenedores, palés y cajas llevados a los diferentes puntos de consumo, se tendrán que devolver, ya sea para reutilizarlos o reciclarlos. Este movimiento se suele realizar durante las entregas, se deja el contenedor lleno y se recoge el vacío, y antes de volver al punto de origen para cerrar el ciclo se visita una zona de vacíos.

2.4 Clasificación de las políticas de suministro

Tal y como se ha visto en el apartado anterior, la logística en planta incluye varias etapas y viene caracterizada por múltiples condicionantes tanto de los productos, del sistema de producción como de la fábrica en sí. En particular, Hanson (2012) define el suministro de material en planta como el suministro de piezas que tiene lugar dentro de una planta de montaje, desde la recepción de las piezas hasta su entrega en el punto de consumo. Esto incluye diferentes actividades a considerar durante el proceso que definirán el sistema de suministro de material (MSS), en el cual Johansson (2007) incluye seis elementos: la alimentación de piezas, la gestión del almacén, cómo se realizará el transporte, qué medios de manutención se utilizarán, el tipo de embalaje a utilizar y el sistema de control de producción.

Con el objetivo de facilitar la comprensión de las entregas a las líneas de las fábricas de montaje de automóviles, se diferenciarán ocho características que definirán el tipo de política de suministro a utilizar para cada componente (ver Tabla 1).

Dependiendo del elemento de manutención utilizado, las piezas pueden entregarse a través de *conveyor* o las entregas se pueden realizar de forma terrestre utilizando elementos de manutención. Las piezas grandes ($> 1 m^3$) se entregan generalmente

a través de *conveyors* aéreos, si existe, desde las instalaciones del proveedor al punto de consumo. Todas las otras partes se deben entregar a través de rutas terrestres según sus características, frecuencia o ubicación de origen utilizando equipos convencionales de manejo de materiales.

Las entregas monoreferencia corresponden con contenedores de una única referencia. Las entregas multireferencia incluyen aquellas piezas ensambladas o unidas en kits o carros antes de ser entregadas a la línea. La estrategia de gestión del stock de la planta para cada pieza podría ser revisión de un punto de pedido, revisión periódica o entregas en secuencia. En el punto de pedido las partes se deben entregar a las estaciones cuando las piezas se han consumido hasta cierto nivel previamente definido por los responsables (Pan, Chang, & Ni, 2012). En la revisión periódica, las partes se pueden agregar y secuenciar adecuadamente y, dentro de un intervalo de tiempo fijo, la posición del inventario de cada componente se eleva hasta un nivel determinado (Zammori, Braglia, y Castellano 2016). La entrega en secuencia se da cuando un automóvil consume una pieza de las disponibles y las partes han sido secuenciadas previamente.

Tabla 1. Características para definir los modos de transporte a líneas de montaje con mezcla de modelos.

Característica		Variantes	
Medio de manutención	<i>Conveyor</i>	Terrestre	-
Piezas	Mono Referencia	Multi referencia	-
Origen del almacén	Almacenes descentralizados	Almacenes centrales	-
Punto de uso	Un único punto de consumo	Varios puntos de consumo	Un punto de entrega diferente al de consumo
Tamaño pieza	Pequeño (< 0.3 m ³)	Mediado (>1 m ³)	Grande (< 1 m ³)
Entregas	Kit	Lote	
Aleatoriedad de la actividad	Punto de pedido	Revisión periódica	Entrega en secuencia (JIS)
Entrega	Envío directo	Envío directo múltiple	Ruta <i>milk-run</i>

Fuente: elaboración propia.

Además, dependiendo del consumo de las referencias de la planta y la disponibilidad de los elementos de manutención, la política de entrega puede ser la entrega directa, es decir, las piezas se envían cuando una orden solicita una unidad de carga. La entrega directa múltiple, varias partes se unen en el mismo MHE y se entregan según lo solicitado. Según el MHE y las piezas solicitadas, la cantidad de piezas por entrega y ruta puede cambiar. En las rutas *milk-run*, un tren recoge partes del almacén hasta un punto de consumo en una ruta y en un horario predeterminada (Droste y Deuse 2011).

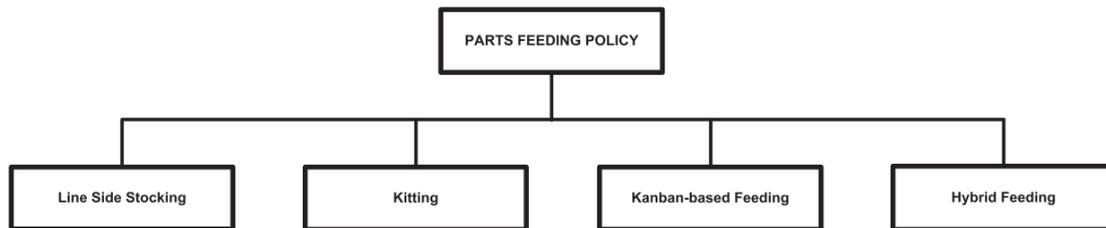
2.5 Políticas de suministro de material en planta

Las políticas de aprovisionamiento de piezas (*feeding policies*), consisten en la definición de la disposición y el modo de entrega del material a la línea de montaje (Hanson, 2012). Las principales políticas que incluye la literatura son el *kitting* y el almacenamiento en línea. En él, se va reponiendo según se va terminando, o suministro *just-in-time*, se entrega en el momento junto en el que se va a necesitar (Caputo, Pelagagge, y Salini, 2015a). Además de estas, hay otras soluciones de aprovisionamiento más especializadas como las secuenciadas, el kanban, *milk-run* o el *Set Parts Supply System* (Alnahhal y Noche, 2013; Caputo et al., 2015a; Jainury et al., 2014).

Kilic y Durmusoglu (2015) realizaron una revisión de la literatura que resume los diferentes tipos de clasificaciones de políticas de aprovisionamiento, las cuales han generado una gran discusión entre los investigadores. Proponen una clasificación de políticas de suministro tal y como muestra la Figura 4. En su trabajo apoyan que, dependiendo del tipo de política de aprovisionamiento, política del almacén y la adecuación de los medios de manutención, el sistema de suministro interno puede variar. Además de ello, según la experiencia se ha visto que existen otras consideraciones que pueden influir en esta decisión de cómo realizar las entregas dada su relación con la eficiencia del manejo de materiales como son el *layout*, la tipología de los pasillos, la asignación de productos o las directrices de la planta (ver Figura 5).

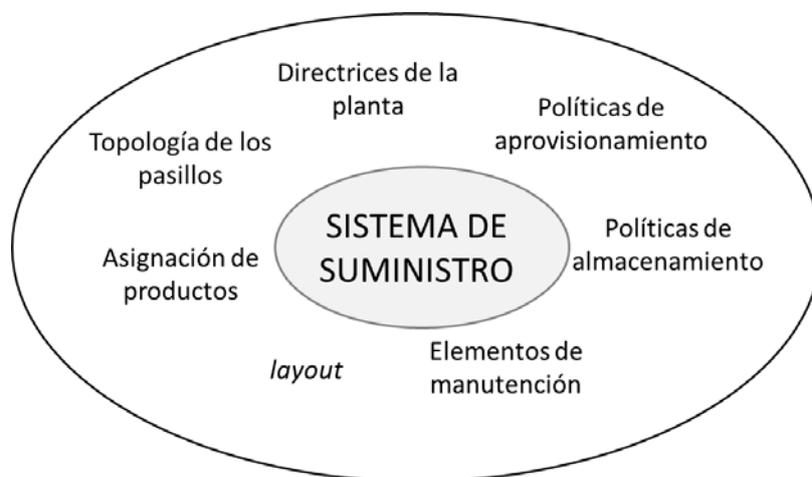
Dada la amplia discusión que genera este tema en la literatura, en los siguientes apartados se presentan brevemente los diferentes tipos de políticas de suministro a línea según la clasificación de Kilic y Durmusoglu (2015). Para cada una de ella se presentan algunas variantes existentes y su aplicación en 3 casos reales de plantas de fabricación de automóvil sobre las que se apoya el análisis empírico de esta tesis. Las tres plantas pertenecen a un mismo fabricante reconocido a nivel mundial.

Figura 4. Subcomponentes de las Políticas de alimentación de piezas.



Fuente: Kilic y Durmusoglu (2015).

Figura 5. Factores que influyen en el diseño de los sistemas de suministro de material a líneas de montaje.



Fuente: Elaboración propia.

2.5.1 Política de almacenamiento en línea

El almacenamiento en línea, también llamado aprovisionamiento continuo, es la política de suministro más antigua utilizada en las fábricas de montaje de automóviles. Originalmente, se almacenaba todo el producto junto a la línea, posteriormente, ya sea por la implantación de técnicas de fabricación visual o el crecimiento de variantes y de la producción, fue necesario su almacenamiento fuera de la línea. Esta política corresponde con el sistema de entrega directo más básico de piezas de referencia única en contenedores grandes (Faccio, 2014; Hua y Johnson, 2010). Los contenedores contienen grandes cantidades y simplemente se almacenan a lo largo de la línea (Caputo, Pelagagge, y Salini 2015c). El operario de la línea es quien debe identificar qué parte requiere cada coche de la secuencia, seleccionarla de los contenedores disponibles en la estación y ensamblarlo durante la producción (Boysen y Emde, 2014). El punto de secuenciación de este tipo de suministro estaría en el punto de montaje o de consumo.

Cuando el material junto a la línea llega a un punto de pedido, se emite una orden de petición de material y la pieza se sirve desde los almacenes centrales. Esta gestión del stock recibe el nombre de punto de pedido o *reorder point*. El fabricante estudiado en esta tesis define esta política como entregas *call*, porque es el trabajador de la estación quien da la orden de pedir más material a través de una botonera de llamada cuando el nivel de stock alcanza el punto de pedido. Esto exige fijar un stock de seguridad para la irregularidad en el consumo durante el tiempo de servicio. Una variante de este sistema de suministro en el fabricante es el conocido por este fabricante como *autocall*. La principal diferencia radica en que es el sistema de manejo de materiales quien realiza la llamada de material al almacén y no al trabajador. El sistema anticipa cuándo se alcanzará el punto de pedido ajustando el inventario al consumo esperado según la secuencia de producción de la línea.

Una vez recibida la petición de material, bien de forma manual desde la línea o automática, los operarios del almacén preparan el pedido en una zona de selección. Un conductor de una carretilla remolcadora irá a recoger el producto a la zona de selección del almacén y lo entregará al punto de consumo en una política de entrega directa de un rack. Según las necesidades de la planta y la distancia entre almacenes y puntos de consumo entre otros, se realizarán repartos conjuntos de hasta cuatro contenedores en un solo viaje, dependiendo de las condiciones de seguridad establecidas en la planta. Hay que considerar que un mismo componente se puede consumir en uno o más puntos de la misma planta simultáneamente.

El vehículo que mueve el producto generalmente no mide más de 6 m de largo. La operación en el punto de entrega consiste en que el conductor ha de bajar de la carretilla, desenganchar el palé lleno y enganchar el vacío, y dura alrededor de un minuto.

El contenedor vacío debe recogerse en el mismo viaje de entrega para devolverlo a su punto de origen, pero puede ocurrir que durante la entrega el contenedor no se haya terminado y siga quedando material dentro. En ese caso el conductor deberá decidir si esperar hasta que el primer palé se vacíe, o si lo vacía moviendo los componentes del palé semivacío al nuevo. El contenedor vacío se recoge por el mismo conductor del remolque y se envía al punto de vacíos. Luego, la entrega al ciclo finaliza donde comienza una nueva entrega.

Este sistema mejora la disponibilidad del producto, tiene una mayor cantidad presente en línea y tiene la ventaja de que no hay una doble manipulación, únicamente en el almacén y el punto de consumo; también es bastante flexible en

caso de eventos inesperados (Bozer y McGinnis, 1992). La política conocida como suministro en lotes también entrarían dentro de esta (Kilic y Durmusoglu, 2015).

2.5.2 Política kanban

Kanban se refiere a la política de suministro continuo de pequeños contenedores que albergan piezas generalmente pequeñas asociadas a una tarjeta que controlan la producción y el flujo de reaprovisionamiento (Kumar y Panneerselvam 2007).

Este producto se suele disponer junto a la línea en una estantería con pequeñas gavetas, por algún motivo casi todas de color azul, en las que se ubican cada una de las referencias, es decir, son gavetas monoreferencia. Para cada referencia se puede tener varias gavetas según el stock estimado necesario para cubrir el ciclo de reposición.

En el caso de que el componente tenga varias referencias, el operario de la línea es quien selecciona la pieza a utilizar en cada operación, por lo que el punto de secuenciación se encuentra en la misma línea de montaje. La reposición de estas referencias se realiza desde los llamados supermercados o almacenes descentralizados. Estas áreas se suelen ubicar cerca de la línea donde el conductor del carro kanban repone en el carro de transporte las gavetas vacías por las llenas y reinicia la ruta de suministro (Caputo et al. 2015c).

El proceso de reposición podría ser como sigue. Una flota de carretillas remolcadoras con una o varias estanterías, realizan rutas periódicas preestablecidas dentro de la planta, también llamadas rutas del lechero (rutas *milk-run*). Antes de la ruta, el carretillero va al almacén a recargar y después, la remolcadora visita cada uno de las estaciones de la línea entregando gavetas llenas y recogiendo las vacías. Las gavetas incluyen toda la información en relación a la pieza que contienen (Faccio, 2014).

Al terminar la ruta visita el supermercado, donde reponen las gavetas vacías por llenas a la espera de iniciar de nuevo la ruta. Este tipo de reposición se conoce como revisión periódica. El *stock* disponible en línea ha sido previamente estimado para que se pueda dar servicio al consumo de la línea y se mantenga un *stock* de seguridad.

Aunque los sistemas por revisión periódica generalmente implican que los componentes consumidos se reponen cada vez que pasa la ruta por cada punto de consumo, una forma más efectiva de manejarlo es considerar el consumo real de la

línea y planificar la reposición e incluso lotificar, lo que evita tener que realizar paradas innecesarias en todos los puntos de la línea.

Las plantas que se presentarán a lo largo de esta tesis llegan a tener una docena de rutas, la mayoría de las cuales son de periodicidad horaria. Dependiendo de los productos, su frecuencia puede variar de una ruta por hora a una por turno. Un vehículo puede medir alrededor de 14 m de largo, cada parada dura varios minutos, y es el conductor del vehículo quien tiene que bajar en cada punto de consumo para entregar los productos. Como la ruta de entrega es circular, el ciclo de retorno en este tipo de flujo está incrustado en la ruta.

Una variante de las rutas Kanban es el llamado *refilling*. Este sistema de suministro es similar, periódicamente mediante rutas se revisa el stock de cada punto de consumo y se rellena con el material disponible en la carretilla. A diferencia del kanban no hay un control de la cantidad repuesta, sino que el contenedor disponible en el punto de consumo se completa de material hasta llenarlo. Este tipo de suministro se utiliza para aquellas referencias que debido a su tamaño y forma no se transportan en contenedores pequeños, como pueden ser las alfombras o las espumas.

2.5.3 Política *kitting*

Cuando el número de número de componentes a ensamblar en una misma estación aumenta, el espacio de almacenamiento de la línea lateral puede llegar a ser insuficiente. Una política razonable consiste en ensamblar las unidades en un área independiente y entregarlas en la línea según secuencia esperada.

Kitting significa que varias partes se agrupan y clasifican en contenedores con kits de piezas, y a continuación se entregan *Just-In-Sequence* (JIS) en la línea de montaje pero no en el punto de consumo, para así poder así realizar la operación de montaje en el vehículo con el kit correspondiente (Boysen y Emde, 2014; Caputo et al., 2015d; Taylor, Hanson, y Medbo, 2012).

Generalmente, los kits se utilizan para pequeñas piezas, ya que evita tener una zona de selección de piezas en una estación de montaje. Sin embargo, esta actividad de selección se extrae y se ubica en los almacenes próximos a la línea. Las áreas logísticas para preparar los kits en la industria del automóvil reciben el nombre de supermercados o células (Emde, Fliedner, y Boysen, 2012). Se denominan supermercados porque son los operarios los que recorren la zona de almacén

tomando todas las partes necesarias de acuerdo a la secuencia de montaje. (Battini, Faccio, Persona, y Sgarbossa, 2010).

Una posible variedad de los supermercados como áreas de almacenaje descentralizada es la propuesta de Boysen y Emde (2014) en la que sugieren incorporar las zonas de *kitting* a las propias estaciones de la línea, de manera donde un operario logístico se dedicaría a preparar los kits y el operario de la línea a ensamblarlos en el vehículo. Los autores destacan que esta propuesta se ha aplicado recientemente por un fabricante de vehículos alemán. Esta variedad combina las ventajas del *kitting* con las del almacenamiento en línea.

Una vez preparados los kits, estos se pueden entregar bien por *conveyor* o de manera terrestre con ayuda de una carretilla remolcadora. En ambos casos puede ser que el kit se entregue al inicio de la línea y que viaje junto con el vehículo, o que se entregue directamente en la estación en la que se va a utilizar o que el kit se mueva con el automóvil hasta el final de la línea y tiene que regresar cuando está vacío. En ambos casos es necesario el retorno de vacíos, ya sea con un *conveyor* o con carretillas remolcadoras.

Las principales ventajas de esta política de suministro son según Bozer y McGinnis, 1992; Limère, Landeghem, Goetschalckx, Aghezzaf, y McGinnis (2012):

- Reduce el nivel de stock y con él la necesidad de espacio.
- Menor tiempo de transporte.
- Menos tiempo de búsqueda de las piezas en la línea.
- Facilidad de programar el aprovisionamiento de kits.
- Mejores condiciones ergonómicas.
- Permite operaciones con pequeños lotes y una gran variedad de productos.

Por otra parte, como desventajas se podría identificar (Bozer y McGinnis, 1992; Faccio, 2014; Kilic y Durmusoglu, 2015):

- La manipulación extra que requieren estas áreas de *kitting*.
- Los posibles errores de manipulación y calidad de los kits.
- El espacio de almacenaje que requieren estas áreas de *kitting*.

2.5.4 Política de piezas secuenciadas

Esta política se considera como una variante dentro de la política *kitting* (Kilic y Durmusoglu, 2015). A diferencia del *kitting*, las entregas secuenciadas contienen un único subconjunto previamente ensamblado y que se entrega al punto de consumo

sincronizado con la secuencia de la línea de montaje (Jainury et al. 2014). Estas células de secuencia, al conllevar una operación como es el ensamblaje (actividad de valor agregado), requiere de otras decisiones como, por ejemplo, las asociadas al control de calidad. La principal ventaja de esta política es (1) reducir el espacio necesario junto a la línea, y (2) que a la línea se entregan las piezas llegan JIS. En este caso, el punto de secuenciado se encuentra en las células.

Estas piezas pueden llegar directamente desde el proveedor ya secuenciadas. Originalmente estos movimientos en las plantas se realizaban utilizando transportadores aéreos desde los proveedores que no interfieren con el resto de flujos en la planta. Sin embargo, la capacidad del transportador dejará de ser suficiente a medida que crezca el número de subconjuntos y variantes que se entregan en secuencia y se ha recurrido a las entregas secuenciadas terrestres. Los proveedores envían las piezas secuenciadas y colocadas en carros que se almacenan y/o entregan directamente en el punto de consumo. Por otra parte, si esta actividad se realiza dentro de la planta, ya sea por un proveedor o por el mismo fabricante, se dispondrá de un área con células de secuenciado en las proximidades de la línea.

Los carros secuenciados ofrecen varios subconjuntos secuenciales de gran tamaño y multireferencia. La capacidad puede variar entre 3 y 75 subconjuntos dependiendo del tamaño del contenedor y las dimensiones de estos. Cuando los carros están llenos o cuando se solicitan por cualquier otra razón, un vehículo remolcador los transporta desde la célula secuenciada hasta su punto de consumo. La política de entrega del vehículo puede estar entre uno y cuatro carros secuenciados para las entregas múltiples, lo que requiere una ruta de transporte. Los carros vacíos en la línea de montaje (los que ya están en uso) deben regresar al punto inicial de la célula.

En función de la experiencia de las plantas evaluadas en esta tesis se sabe que este tipo de suministro está ganando relevancia en la industria del automóvil, como ejemplo cabe destacar que, en la fábrica más compleja analizada, el volumen de este tipo de entregas ha pasado de 24 referencias a 260 en tan solo 15 años en una de las plantas conocidas.

2.5.5 Políticas híbridas y otras consideraciones

La selección entre tales políticas es a menudo una cuestión de juicio cualitativo, y está influenciada por la estructura del sistema productivo, el producto, las limitaciones operacionales, las prácticas específicas de la empresa y la tradición (Caputo et al. 2015a).

Según la literatura hay una clara tendencia a utilizar políticas de suministro híbridas, que implicarían la aplicación de más de una política simultáneamente en una misma línea de montaje (Kilic y Durmusoglu, 2015). Aunque no hay muchos trabajos de investigación sobre este campo y sobre una efectiva selección de las políticas a utilizar para cada referencia, Hua y Johnson (2010) destacan los siguientes factores a considerar durante la toma de decisiones:

- El impacto del producto y su volumen, variedad y tamaño.
- El impacto del componente almacenamiento y manejo de materiales.
- El impacto de sistema de control de la producción.
- El impacto del rendimiento del sistema.

La realidad industrial conocida es que en las plantas se utilizan simultáneamente todas las diferentes políticas presentadas anteriormente. Esto ha ido evolucionando con el paso del tiempo, y la evolución ya se aprecia en la obsolescencia del sistema informático de manejo de materiales. Por ejemplo, los campos de texto disponibles para mantener la trazabilidad del flujo del producto dentro de la planta solo contemplan que las piezas sigan un suministro de tipo almacenamiento en línea que es el sistema tradicionalmente utilizado. El programa te sugiere que el producto salga de un almacén y se entregue en una o varias localizaciones de consumo dentro de la línea de montaje. Sin embargo, la realidad actual es que hay piezas que pueden pasar más de rutas, no se acoplan a este tipo de estructura de datos y requieren de otro modo de gestión informática de su flujo.

Además, es importante considerar que cualquiera de las áreas utilizadas para las actividades de manipulación externalizadas de la línea, como por ejemplo los supermercados o células, contienen material almacenado y, por tanto, se deben alimentar con los elementos necesarios para realizar la actividad. De manera que existe un doble flujo de suministro para alimentar a estas áreas que, a su vez, suministran las líneas.

A modo de ejemplo, en algunas ocasiones las puertas se montan en una línea separada y se entregan a través de un transportador aéreo hasta su punto de consumo en la línea final. Las líneas de las puertas se alimentan con flujos con suministros *call*, *kanban*, carros secuenciados y *kitting*. Algunas de las diferentes células de *kitting* que suministran a la línea de puertas, a su vez, se alimentan con otros envíos *call* y *kanban*. Como ejemplo, en una de las plantas, los espejos retrovisores se sirven secuenciados desde una estación separada y se montan en un kit que se envía a la línea de puerta, y de ahí se envían al punto de consumo de las

puertas en la línea de montaje final. Esta complejidad del movimiento de material ha ido creciendo y no es posible reflejarla en los sistemas tradicionales de gestión de referencias.

Tabla 2. Resumen de las características de cada política de suministro a línea de montaje.

		Al. en línea	Kanban	Kitting	Secuenciado	Híbridas
Medio de manutención	Terrestre	x	x	x	x	x
	Conveyor			x	x	x
Piezas	Mono referencia	x				x
	Multi referencia		x	x	x	x
Origen del almacén	Centralizado	x				x
	Descentralizado		x	x	x	x
Punto de uso	Un único punto de consumo	x	x	x	x	x
	Varios puntos de consumo	x	x			x
	Un punto de entrega diferente al de consumo			x		x
Tamaño pieza	Pequeño		x	x		x
	Mediano	x			x	x
	Grande	x			x	x
Entregas	Kit		x	x	x	x
	Lote	x				x
Aleatoriedad de la actividad	Punto de pedido	x				x
	Revisión periódica		x			x
	Entrega en secuencia (JIS)			x	x	x
Política de entrega	Envío directo	x		x	x	x
	Envío directo múltiple	x		x	x	x
	Ruta <i>milk-run</i>		x			x

Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, se debe considerar otro conjunto de movimiento de material periódicos en las inmediaciones de la línea, como es el movimiento de unidades vacías, como el retorno de patines si fuera el caso, soportes, cajas de cartón, protectores de puertas, etc. Otros flujos periódicos como la liberación de plástico y papel, permite el uso de AGV.

Finalmente, cada una de las políticas expuestas a lo largo del capítulo se han resumido con las características presentadas en el apartado 2.4 (ver Tabla 2).

2.6 Discusión del estado del arte de suministro en el automóvil

Hasta el momento, se ha podido ver como la evolución de la industria del automóvil presenta una serie de cambios en su gestión, como es la tendencia hacia la fabricación multimodelo con su personalización en masa y el correspondiente aumento en la variedad de piezas y componentes a gestionar. Lo que se busca al fabricar más modelos es racionalizar y consolidar las instalaciones buscando economías de escala.

Esta situación plantea nuevos retos en la logística interna para gestionar tanto las operaciones como las personas. Simultáneamente se han de coordinar muelles, almacenes, peticiones de material, recursos y demás elementos de mantenimiento, todo en un tiempo récord ya que no se debe olvidar que lo primordial es no dejar sin suministro a la línea.

La gestión de la logística interna se vuelve cada vez más compleja en cuanto a la cantidad de variantes y etapas de suministro a gestionar, lo cual supone un gran impacto económico para los fabricantes. Es por ello que un buen análisis y planificación previos a la implantación de nuevas medidas logísticas es de vital importancia para garantizar la eficiencia del sistema de suministro de material en sí.

En los últimos años han aparecido una gran cantidad de problemáticas de índole logística a trabajar en las fábricas como es la mejora de la eficiencia del transporte, la selección de las políticas de suministro, gestión de flotas, rutas, dimensionado, localización de almacenes etc. ya que el espacio junto a la línea es reducido respecto a las necesidades actuales.

No hay que olvidar que la mayoría de las fábricas se construyeron hace décadas, cuando la personalización del producto era mínima, la variedad de modelos también y los vehículos eran mucho más pequeños, de manera que el espacio disponible en los pasillos adyacentes a la línea de montaje y a las proximidades de la planta de montaje fueron dimensionados para otro tipo de producción al actual.

No solo los elementos de mantenimiento durante el suministro se mueven a lo largo de las plantas, sino que hay otro elemento a considerar que son los trabajadores a pie. Los momentos más relevantes son los que tienen lugar durante los cambios de turno ya que aparece un flujo peatonal y los demás elementos de mantenimiento deben ceder su paso.

También se debería prestar atención al considerado el flujo más relevante en las plantas de ensamblaje, el flujo de los automóviles. Las unidades que provienen del taller de pintura están secuenciadas en líneas de ensamblaje, donde se mueven en diferentes tipos de transportadores (terrestres y aéreos). Si son terrestres, podrían interferir, o no, con otros tipos de flujo. Si interfieren, esto debe tenerse en cuenta al diseñar la red de pasillos.

Se puede afirmar que las rutas seguidas por los automóviles apenas cambian durante la vida útil de una instalación dada. En cambio, las rutas disponibles para carretillas y peatones son mucho más fáciles de cambiar y podrían ser objeto de estudio.

En aquellas fábricas en las que se produce un único modelo, los pasillos adyacentes a la línea están prácticamente vacíos, tanto de material como de personal. En cambio, en las plantas multimodelo, las estaciones están abarrotadas de producto, los pasillos ocupados por diversos medios de mantenimiento y de personal circulando.

Actualmente, la evolución de la industria implica que el espacio junto a la línea es escaso y aparecen nuevos desafíos para hacer un uso eficiente del espacio junto a la línea. Para ello las plantas trabajan en la adopción de nuevas políticas de suministro que permitan gestionar la gran cantidad de referencias en un menor espacio y garantizando el servicio a tiempo. Esto requiere de una gran coordinación en el transporte para evitar que coincidan simultáneamente múltiples medios de mantenimiento en un mismo pasillo y que puedan generar conflictos o interponerse en el trabajo de los otros flujos. Otro desafío sería la gestión del espacio en las proximidades de la línea para albergar la externalización de actividades de manipulación y almacenaje de las estaciones de la línea a la vez que se asegura la eficiencia del suministro.

Por otra parte, periódicamente los modelos de automóviles se van actualizando y se les van incorporando nuevas variantes. Estos cambios en el diseño conllevan nuevos lanzamientos en las plantas, los cuales tienen un efecto en la producción y la logística interna. Los sistemas de producción multimodelo están sujetos a un mayor número de lanzamientos. Además, tal y como se ha visto, la tendencia futura es que

los modelos se actualicen cada año en lugar de cada 2-3 años como ocurre actualmente, lo que supondrá, en los sistemas multimodelo, nuevos lanzamientos cada pocos meses o incluso lanzamientos simultáneos de diferentes modelos.

De los lanzamientos se sabe que, tanto en plantas monomodelo como multimodelo, exigen un gran trabajo por parte de todo el personal involucrado en la cadena de suministro. Y es que, por un tiempo, se ha de mantener la producción actual e incorporar poco a poco las nuevas variantes. Esto genera problemas como la incorporación de cambios en la producción, y la revisión del sistema de manejo de materiales por completo porque un porcentaje de los componentes se convierten en obsoletos.

Normalmente, dada la cantidad de cambios a efectuar en las fábricas se suele requerir colaboración externa en el proceso de toma de decisiones. En estos proyectos se suelen explorar diferentes preocupaciones del fabricante, donde se evalúan diversas situaciones actuales y futuras y se rediseñan posibles cambios en las instalaciones con diferentes objetivos.

Entre estas decisiones se encuentran algunas que se definirán como 'macro' o con un alcance más estratégico y otras 'micro' a nivel más operativo. Las decisiones macro se relacionan con temas de diseño de instalaciones, localización o asignación de instalaciones, productos, proveedores, muelles, almacenes, inversiones o diseño del proceso de la logística interna general. Las decisiones 'micro' implican evaluaciones del flujo de material y decisiones para definir las etapas y modos de suministro, como problemas de gestión de muelles y recepción de camiones, asignación de tareas, productos y personal, selección de políticas de suministro, gestión de rutas etc.

La experiencia indica que hay dos objetivos clave en las evaluaciones previas a los lanzamientos. El primero de ellos está relacionado con la eficiencia y el coste de transporte y personal. La eficiencia juega un papel clave en la industria ya que repercute directamente en la productividad del sistema, siendo uno de los principales objetivos no permitir que la línea de montaje se quede sin alimentación de piezas (Ellis, Meller, Wilck, Parikh, y Marchand, 2010; J. Wang et al., 2011). Además de ello, según Battini, Boysen, y Emde (2013) una planta de automóviles media requiere de la entrega de más de 13.000 contenedores para suministrar entre 10-15m³ por coche fabricado al día procedentes de un gran número de proveedores. Esta cantidad de entregas son necesarias ya que, si se quisiera tener 2

horas de stock junto a la línea en una fábrica con una producción diaria de 2.000, sería necesario tener 2.500 m³ de material a lo largo de las estaciones.

El objetivo de eficiencia ha sido ampliamente considerado en la literatura, siendo algunos de los medibles más utilizados los metros recorridos, los recursos requeridos, los envíos realizados, el rendimiento de los medios de manutención o el nivel de servicio. Burinskiene (2011) intentó reducir la distancia total de viaje de las carretillas elevadoras en los almacenes con un enfoque de tareas múltiples utilizando simulación. Longo, Mirabelli, y Papoff (2005) intentaron minimizar los costes del manejo de materiales determinados por el flujo de materiales y las distancias entre las máquinas. Seebacher, Winkler y Oberegger (2015) sugirieron un enfoque para la evaluación a través de DES de la eficiencia logística en la planta, estimado como el porcentaje de tiempo productivo del tiempo total disponible. Francisco et al. (2016) evalúan dos configuraciones de manejo de materiales diferentes: los sistemas basados en personas o los sistemas automatizados en tareas de logística interna. Andrejić y Kilibarda (2016) propusieron un enfoque para medir y mejorar la eficiencia de los procesos logísticos mediante el número de entregas, las distancia o la utilización del vehículo.

El problema del suministro de piezas tiene un gran impacto económico ya que puede generar ahorros potenciales si hay una buena relación entre el diseño de *layout* y el flujo de material asociado, donde los productos se transportan entre las diferentes áreas de una manera simple, tratando de minimizar los flujos, las distancias transportadas, y reduciendo así la cantidad de personal en las instalaciones (Centobelli et al., 2016; Gamberi, Manzini, y Regattieri, 2009). Sin embargo, no solo la cantidad de conductores repercute en el coste sino también los inconvenientes generados por el exceso de movimientos, como el riesgo de sufrir retrasos o un inadecuado envío de piezas, lo que además, puede reducir el rendimiento general del sistema (Golz et al., 2012; Pan et al., 2012; Wänström y Medbo, 2009).

La gestión del flujo de material asociado a la logística interna es una tarea compleja y supone un reto para los responsables, ya que además del *layout* y la tipología de la red de pasillos entre instalaciones, depende de factores como las políticas de suministro, la asignación del espacio de almacenaje o la elección de los medios de manutención entre otros. Además de ello, la eficiencia se ha tratado de mejorar mediante el análisis del flujo de material a lo largo de la planta.

Sin embargo, no todo está relacionado con la eficiencia y el coste, sino que un segundo objetivo más reciente que se ha vuelto clave para algunos fabricantes y es

la seguridad y los riesgos del personal. Y es que una cantidad de movimientos en los pasillos adyacentes a la línea y en las instalaciones contiguas a la de montaje final y en los accesos a estas, pueden generar tráfico e ineficiencias del flujo de material, como puede ser posibles retrasos del suministro.

En las plantas de montaje siguen utilizando carretillas elevadoras para el suministro, las cuales conllevan un elevado volumen masivo de accidentes y problemas para los trabajadores. Algunos fabricantes ya no permiten su uso fuera de entornos de almacén, teniendo indicadores de seguridad que miden la cantidad de metros cuadrados libres de carretillas elevadoras como muestran los trabajos de Bauters, Govaert, Limère, y Landeghem (2015); Cottyn, Govaert, y Van Landeghem (2008) y Zhang, Shah, y Baliga (2016) entre otros. Hay que tener en cuenta, que, además, los carretilleros dentro de estas plantas pueden estar contratados por diferentes proveedores, lo que puede influir en su coordinación a la hora de trabajar.

Por otra parte, no solo el volumen de movimientos, sino también los pasillos de flujo mixto (por ejemplo, trabajadores y diversos medios de manutención) y otras circunstancias como la iluminación o el ancho de los pasillos, pueden aumentar la posibilidad de estos incidentes. Esta situación podría causar dos consecuencias: pérdida de productividad en las líneas de montaje y baja seguridad para los trabajadores.

Leveson (2004) apoyó que los nuevos cambios en el entorno de trabajo como el incremento de complejidad de sistemas o en la interacción entre trabajadores y automatización de trabajos entre otros, requieren de técnicas para la prevención de riesgos y accidentes. De manera que, dada la preocupación de los gerentes en cuanto a la eficiencia y seguridad, y las últimas tendencias que conllevan cambios para el diseño de la logística interna, deberían de ir acompañados de evaluaciones de eficiencia y seguridad.

2.7 Conclusión

A lo largo de este capítulo se ha presentado una visión general de la realidad industrial del automóvil. Para ello se han revisado diversos aspectos de este sector.

En primer lugar, se ha presentado la evolución del consumo de automóviles en los últimos años y las tendencias de los próximos diez años. Los resultados de la revisión detectan como aspecto clave el hecho de que la demanda de automóviles decaerá y también cambiará el paradigma de producción hasta ahora conocido. La fabricación tenderá a ser multimodelo con una personalización en masa del

producto y una reposición de nuevos modelos anualmente. Esto conlleva grandes cambios en la logística interna al tener que gestionar más decenas de miles de referencias de diversas características y asegurar su suministro a tiempo a la línea de montaje.

Para conocer qué considera la logística interna del automóvil, se presenta detalladamente cada una de las etapas de suministro desde la recepción del material en los muelles de recepción hasta su correspondiente entrega en la línea de montaje. A lo largo del proceso van apareciendo diversas opciones según las decisiones establecidas que vendrán marcadas por el tipo de material a suministrar.

Para decidir el modo de suministro en la última etapa de la logística interna, desde los almacenes previos hasta la línea de montaje, se han presentado y clasificado cada una de las características que definen las políticas de suministro y que ayudan a decidir qué política es más apropiada según el caso en el que se encuentre.

A continuación, cada una de las principales políticas de suministro descritas en la literatura se han presentado de manera individual, almacenamiento en línea, kanban, *kitting*, piezas secuenciadas y políticas híbridas.

Finalmente, se ha documentado un resumen del capítulo en cuanto a la problemática actual y qué aspectos son los más reseñables en las plantas multimodelo actuales y futuras, la eficiencia y el tráfico de elementos de mantenimiento. A continuación, se deberá revisar la literatura existente sobre la logística interna a líneas de montaje de automóviles para ver qué tipos de problemas se plantean en la literatura, cómo se enfrentan y qué estrategias de resolución proponen.

3 REVISIÓN SISTEMÁTICA DE LA LITERATURA SOBRE LOS SISTEMAS DE APROVISIONAMIENTO A LÍNEAS DE MONTAJE

3.1 Introducción

En el capítulo anterior se ha introducido la logística interna de aprovisionamiento a líneas de montaje. En concreto se habían visto las tendencias y preocupaciones de fabricantes e investigadores. En particular, la complejidad en cuanto al número de variantes, la falta de espacio junto a la línea y la gran cantidad de envíos mediante elementos de manutención a la línea para evitar el almacenamiento de material junto a esta.

Este capítulo recoge una revisión sistemática de la literatura sobre el aprovisionamiento a líneas de montaje en el automóvil. El objetivo es conocer cómo se ha tratado en la literatura este tema, qué problemáticas son las más trabajadas y qué dicen los autores respecto a posibles problemas del exceso de envíos y movimiento de elementos de manutención junto a la línea.

Este capítulo complementa al anterior en el sentido en que se vuelve a hablar de todo el proceso de la logística interna pero esta vez con un nivel mayor de detalle. Si bien en el anterior capítulo el objetivo era introducir al lector sobre qué era la logística interna y el trayecto del material desde los muelles hasta la línea, en este capítulo se va más allá al introducir cada una de las etapas por separado y con mayor nivel de detalle sobre cada una de las operaciones que se realizan en ellas.

Con el objetivo de complementar el conocimiento de las etapas del suministro y realizar la revisión de la literatura, se va a proponer una metodología de búsqueda sistemática. Se definirán criterios de exclusión e inclusión y las fases seguidas hasta conseguir los artículos finalmente utilizados en la revisión.

A continuación, se propone una clasificación que está basada en una ya existente en la literatura sobre los distintos problemas de decisión y que servirá de base para organizar cada uno de los artículos y presentarlos al lector. En cada uno de los apartados correspondientes a cada una de las etapas del suministro se introducirá dicha etapa y presentarán cada uno de los artículos correspondientes a esta. También se incluirá una tabla resumen para clarificar el contenido.

Finalmente, se discutirán los resultados y se presentarán varias tablas y gráficos para entender la relevancia de la temática entre investigadores y poder detectar posibles líneas futuras de trabajo.

El resto del capítulo se estructura como sigue. En primer lugar, se presentará la metodología de búsqueda. Después la clasificación de artículos a utilizar. A continuación, se presentará cada una de las etapas de suministro con los artículos correspondientes. Finalmente se concluirá el capítulo con una discusión de los resultados y trabajo futuro y las conclusiones.

3.2 Metodología de búsqueda

La metodología seguida ha sido una revisión sistemática de la literatura sobre el suministro a líneas de montaje de automóviles. Las preguntas de investigación a responder con esta revisión de la literatura fueron las siguientes:

- ¿Qué tipo de problemas de decisión de la logística interna a líneas de montaje son los más relevantes en cada etapa de suministro?
- ¿Qué objetivos persiguen estos trabajos?
- ¿Qué herramientas de resolución utilizan?
- ¿Qué dice la literatura sobre los problemas de seguridad a causa del exceso de movimiento de material junto a las líneas de montaje?

Durante la búsqueda, todas las referencias debían contener todas las palabras siguientes en el título, resumen o palabras clave, (1) *assembly*, para delimitar los resultados a entornos de montaje, (2) sinónimos que hicieran referencia al suministro, y (3) especificar que fueran entornos cerrados de producción o del automóvil (ver Tabla 3). La última búsqueda se realizó el 11 de marzo de 2019.

Tabla 3. Palabras clave utilizadas durante la búsqueda de literatura.

Requisito 1 – Entornos de montaje	Requisito 2 – Suministro de material	Requisito 3 – Entornos de producción o automóvil
<i>assembly</i>	<i>supply</i>	<i>manufacturing</i>
	<i>feeding</i>	<i>automotive</i>
	<i>logistic</i>	<i>automobile</i>
	<i>“material flow”</i>	<i>layout</i>
	<i>“material handling”</i>	<i>“assembly line”</i>

Fuente: Elaboración propia.

De esta búsqueda se obtuvieron 1495 resultados, a los cuales se les aplicó un primer filtro en la propia base de datos utilizando los criterios de inclusión I, II y III y que se definen a continuación. De este primer barrido, se obtuvieron 702 artículos de

revista, los cuales se descargaron e importaron al gestor de referencias Mendeley para iniciar una primera lectura de los resúmenes y aplicar todos los criterios de inclusión y exclusión restantes.

Los criterios de inclusión fueron los siguientes:

- I. Artículos científicos publicados en revistas con procesos de revisión por partes en inglés o castellano.
- II. Revistas indexadas en la base de datos *Web Of Science*.
- III. Artículos categorizados operations, manufacturing, management science, economics, business...
- IV. No se limita el periodo de tiempo de la publicación.
- V. Debe hacer referencia en el resumen a líneas de montaje o en su defecto plantas o entornos de ensamblaje.
- VI. Debe constar en el resumen que trabajan el movimiento o manipulación de material en alguna de las etapas de suministro en planta comprendidas entre la llegada del producto a la fábrica hasta su entrega a la línea de montaje.

Los criterios de exclusión fueron los siguientes:

- I. Actas de publicaciones de congresos y libros.
- II. Excluir aquellas disciplinas fuera del alcance de este trabajo como la de sistemas automáticos, ingeniería medioambiente, ciencias ambientales, tecnología nuclear, ciencias de los materiales, física aplicada, salud pública ambiental, ingeniería software, energías fósiles, geografía, electroquímico y mecánico serán excluidos.
- III. Trabajos que traten temas logísticos fuera del proceso de suministro en planta a líneas de montaje.
- IV. Trabajos sobre logística externa de suministro a líneas de montaje.
- V. Trabajos sobre el equilibrado de líneas de montaje.

Durante una primera lectura de los 702 artículos se clasificaron como SI, si respondían a todos los criterios de inclusión, NO en el caso contrario y DUDA para aquellos en los que el resumen no quedaba claro. Los resultados de esta primera búsqueda se consultaron con los demás investigadores para compartir resultados y debatir divergencias. A continuación, se descargaron los documentos completos y se revisaron aquellos categorizados como DUDA y como SI en una segunda lectura. La Tabla 4 muestra los resultados de las dos lecturas realizadas con Mendeley.

De los artículos no considerados para esta revisión, cabe destacar que la gran mayoría correspondían con temas de cadena de suministro. También hablaban de movimiento de material, pero no estaba enfocado a una línea de montaje o no se trataba de movimiento dentro de planta sino externo. Otros de los temas que trataban era la selección de proveedores, negociación y el suministro desde proveedores al fabricante OEM. Otra gran cantidad de artículos descartados tratan temas propios de líneas de montaje, como el equilibrado de líneas, la secuencia de montaje o las operaciones de montaje dentro de la línea entre otros.

Tabla 4. Resultados y clasificación de los artículos después de la primera y segunda lectura.

Después de la primera lectura <i>abstract</i>		Después de la segunda lectura del documento <i>completo</i>		
SI	106	SI	97	89 documentos revisados 8 documentos no encontrados
NO	581	NO	605	581 documentos no considerados
DUDA	15			24 documentos falsos positivos

Fuente: Elaboración propia.

3.3 Propuesta de clasificación de los artículos revisados

La clasificación de los trabajos seleccionados se hizo en función de la etapa de suministro y el tipo de problema tratados, la cual se ha basado en la taxonomía propuesta por Boysen et al. (2015). En este trabajo los autores realizan una revisión de la literatura sobre la logística externa e interna de piezas en la industria del automóvil, en especial se interesan por los problemas de decisión a nivel operativo. De acuerdo a su propuesta, su taxonomía se ha modificado para ajustarse al foco de esta tesis, ya que en esta tesis el foco se limita a la logística interna y problemas tanto operativos como estratégicos.

Esta revisión se diferencia de la de Boysen et al. (2015) en varios aspectos. El primero de ellos es que una gran cantidad de los resultados obtenidos durante esta revisión tratan sobre las políticas de suministro, las cuales tienen un gran impacto en la logística interna del automóvil. Sin embargo, en la revisión de Boysen et al. (2015) no considera este tipo de literatura. Deechongkit y Srinon (2013) afirmaron que la mayor parte de la literatura sobre el movimiento de material en planta corresponde con la determinación de estas políticas de suministro. En segundo lugar, el trabajo

de Boysen et al. (2015) incluye publicaciones hasta el año 2013, en esta tesis se amplía la búsqueda de literatura hasta marzo de 2019. La Tabla 5 recoge la clasificación a seguir con los resultados de búsqueda.

Tabla 5. Clasificación de los artículos dentro de cada una de las etapas de suministro.

Diseño macro (DM)	Recepción de material (RP)	Almacenamiento (ST)	Secuenciado (SC)	Políticas de suministro (SP)	Envíos de material (DL)	Presentación en línea (LP)
Diseño de <i>layout</i> (DM1)	Entregas en secuencia (RP1)*	Almacén central (ST1)*	Las piezas se mueven hacia el operario (SC1)*	Selección de la política (SP1)	Asignación (DL1)*	Palés colocados en el suelo (LP1)
Diseño del suministro (DM2)	Entregas en camiones (RP2)*	Almacén descentralizado (ST2)*	El operario se mueve a buscar las piezas (SC2)*	Implementación de políticas (SP2)	Secuenciación (DL2)*	Pequeños contenedores en estantería (LP2)
		Localización de almacenes (ST3)	Localización de almacenes (SC3)		Carga (DL3)*	
		Asignación de piezas (ST4)	Asignación de piezas (SC4)		Rutas (DL4)*	
					Programación (DL5)*	

Fuente: Elaboración propia ampliando la clasificación de Boysen et al. (2015). Dichas categorías se encuentran marcadas con asterisco.

Los artículos revisados y considerados foco de esta investigación se codificaron con etiquetas según la etapa de suministro a la que hicieran referencia, si se trataba de un problema a nivel estratégico o macro u operativo o micro, y las herramientas de resolución que utilizaban. En cuanto a las herramientas, se distinguieron si se utilizaban métodos cualitativos, analíticos, de optimización, de simulación o híbridos

(más de las anteriores). Se utilizó una hoja Excel para organizar todos los artículos y los códigos.

Tabla 6 Codificación de los artículos considerados positivos durante su revisión.

Nivel	Etapas de suministro	Herramientas
Macro	Diseño	Cualitativa
Micro	Recepción de material	Analítica
	Almacenamiento	Optimización
	Secuenciado	Simulación
	Envío a línea	Híbridas
	Presentación en línea	

Fuente: Elaboración propia.

En los próximos apartados de este capítulo se introducirá cada una de las etapas, recepción de material, almacenamiento, secuenciado, políticas de suministro, entregas a línea y presentación en línea con mayor detalle y se verá qué tipo de problemas de decisión se han trabajado en la literatura y si ha habido una variación desde esta última revisión. Los resultados de esta revisión se han agrupado según la taxonomía propuesta en la Tabla 5. En el caso de aquellos trabajos en los que intervengan más de una etapa del suministro, se asignará a aquella de mayor relevancia en el objetivo del trabajo.

Dentro de los resultados, se pueden encontrar que la mayoría de investigaciones corresponden con un nivel micro, los cuales implican problemas de evaluaciones del flujo de material, definición e implementación de modos de suministro, problemas de gestión, asignación de tareas, productos o personal, y la gestión de rutas entre otros. Las decisiones macro se relacionan sobre todo con temas de diseño de layout, localización o asignación de instalaciones y productos, inversiones y diseño de sistemas de suministro entre otros.

Boysen et al. (2015) destacaron en sus resultados que el proceso de suministro en el automóvil está lleno de problemas de optimización de interés para los investigadores, pero la mayoría de ellos se han cubierto por solo unos pocos trabajos científicos o incluso ninguno, de manera que es un área de trabajo con oportunidades de trabajo futuro.

Además de estas etapas, los trabajos considerados como macro y que traten temas de diseño general en el aprovisionamiento y no de una etapa como tal, se van a

incluir en un apartado independiente, ya que no corresponden con ninguna de las etapas de suministro descritas.

3.4 Diseño del suministro (DM)

El diseño de instalaciones (DM1) es una tarea multidisciplinar de gran exigencia. Sly, Grajo, y Montreuil (1996) la definieron como una tarea que implica la selección y disposición de las máquinas y estaciones, y la ruta del flujo de material y de medios de mantenimiento. Resulta de vital importancia para la supervivencia de los fabricantes en el entorno competitivo global, que sus instalaciones se adapten a las necesidades cambiantes de la producción. Esto obliga a las empresas a ser más ágiles y reconfigurar las instalaciones con un diseño que les permita introducir nuevos productos al mercado y mantener su capacidad competitiva (Shariatzadeh et al., 2012).

Ho, Lee, y Moodie, (1993) propusieron dos métodos heurísticos para analizar el diseño de *layout* mientras consideran el flujo de material de múltiples productos. Para los autores, el mejor diseño tiene un flujo en secuencia, que en general, tienen ventajas como distancias cortas, un mejor manejo de los materiales y del proceso de producción (DM1).

Zhuang, Wong, Fuh, y Yee (1998) presentaron el modelado, análisis y rediseño de un sistema de montaje de gran complejidad y la estimación de recursos para llevar a cabo el movimiento de materiales. Utilizan modelos analíticos y de simulación con los que evalúan los cambios para conseguir mejorar el rendimiento, reducir el tiempo de ciclo trabajando con menos operarios y reducir el inventario WIP (DM1).

Alizon, Dallery, Feillet, y Michelon (2007) investigan el problema de diseño de layout en una planta de montaje de automóviles real. Dada la complejidad del problema los autores proponen un algoritmo en tres etapas basado en heurísticas, cuyo objetivo es proponer una solución eficiente al problema y un marco genérico para que se pueda aplicar a otros contextos (DM1).

El diseño del sistema de suministro (DM2) implica múltiples decisiones, entre las que destaca el flujo de material entre las distintas etapas. Para Johansson (2007) un sistema de diseño de suministro de materiales (MSS) se refiere a cómo los materiales se suministran, almacenan, transportan, manipulan, empaquetan y se planifica y controla su producción. La correcta gestión del proceso de suministro de material es de gran importancia económica debido al ahorro en los costes de mano

de obra de los conductores y al asumir un menor riesgo durante el suministro de piezas a la línea de montaje (Golz et al., 2012).

Arifin y Egbelu (2000) trabajan el diseño de un sistema de AGVs para implantarlo en un sistema de montaje como mejora del sistema de suministro actual (DM2). Para ello utilizan la simulación, pero al tratarse de una herramienta de gran exigencia en cuanto a tiempo y esfuerzos de modelado requerido, proponen el uso de un modelo analítico para estimar los requerimientos de los vehículos en cuanto al número y capacidad. En sus resultados muestran una comparación entre ambas herramientas y comprueban que los modelos de regresión pueden ser una técnica prometedora para la estimación de vehículos.

Ellis, Meller, Wilck, Parikh, y Marchand (2010) estudian el flujo completo que seguirá un producto durante el proceso de suministro desde los muelles y almacenes hasta las estaciones de la línea de montaje (DM2). El propósito de su trabajo era reducir los costes de manipulación al transferir el material y asignarlo a las diferentes instalaciones de cada etapa. Esto se aplicó a una gran planta de ensamblaje.

Zheng, He, y Xue (2014) se preocupan del nuevo desafío al que se enfrentan los fabricantes de automóviles durante el suministro de material a tiempo debido a la elevada flexibilidad que requieren las líneas de montaje (DM2). De este modo, proponen un marco de la logística interna de suministro de material, en el que definen en detalle la estrategia de reposición, las lógicas de cálculo y el flujo de material. En sus resultados muestran como su implementación reduciría el inventario junto a la línea y el aprovisionamiento a tiempo.

Wang, Guan, Shao, y Ullah (2014) trabajan el diseño de la logística de distribución desde diferentes almacenes a una línea de montaje en la que el diseño de *layout* se encuentra limitado por varios factores, como son los elementos de manutención y los pasillos (DM2). En esta planta se trabaja conjuntamente con AGVs y carretillas elevadoras. Al trabajar con un flujo híbrido de elementos de manutención automáticos y manuales, requiere de una buena planificación para evitar posibles colisiones entre vehículos durante el suministro. Para enfrentar el problema los autores proponen utilizar la simulación para hacer frente a diversos factores estocásticos del entorno y poder así estudiar las diferentes estrategias de suministro. También proponen un modelo de optimización basado en algoritmos genéticos para encontrar una configuración de la instalación realista y casi óptima.

Battini, Gamberi, Persona, y Sgarbossa (2015) presentan un marco teórico sobre el suministro a líneas de montaje desde almacenes descentralizados llamados supermercados. El objetivo del trabajo es proporcionar una matriz y una guía práctica a los gerentes de las plantas para ayudarlos en la toma de decisiones sobre el tipo de transporte a seleccionar durante el diseño de la logística interna (DM2). También proponen un modelo analítico de costes en base a diferentes parámetros para seleccionar entre el uso de *conveyor*, AGVs o carretillas remolcadoras. Los autores destacan que la selección del sistema de transporte depende del número de metros a recorrer durante el proceso de alimentación, las dimensiones de la línea y de las estaciones, el *takt time*¹ de la línea y la cantidad de contenedores demandados en cada estación durante el tiempo de *takt*.

Savino y Mazza (2015) presentan un caso de estudio donde implementan técnicas *lean* en una línea de montaje semiautomatizada de componentes de automóviles (DM2). El objetivo del trabajo es proporcionar información sobre el impacto de las características de diseño de suministro en bucle con respecto a la aplicación de los principios *lean*, aportar soluciones operativas relacionadas con la logística y estudiar cómo la técnica *kanban* puede adaptarse a este tipo de diseño.

Sáez-Más, García-Sabater, Llorca, y Maheut (2016) diseñan el sistema de suministro a una línea de ensamblaje del conjunto de motor y transmisión (DM2). Para ello proponen cambios en el diseño de *layout* y consideran el flujo de material entre estaciones para minimizar el tráfico en los pasillos. Utilizan un modelo de simulación por eventos discretos para contribuir y validar la solución.

Lehocká, Hlavatý, y Hloch (2016) analizan el flujo de material a una línea de producción en la industria del automóvil (DM2). Para ello utilizan la herramienta *lean value stream mapping* (VSM) con la que identifican las fuentes de desperdicio del actual proceso de producción y proponen alternativas de mejora como fusionar operaciones, reorganizar la producción, comprar nueva maquinaria y definir las nuevas especificaciones de los puestos de trabajo.

En la Tabla 7 se han recogido todos los trabajos anteriores donde se aprecia la subcategoría a la que pertenecen, si se trata de un caso de estudio o de un caso práctico, el objetivo y el método de resolución utilizado.

¹ Tiempo medio entre el inicio de la producción de una unidad y el inicio de la producción de la siguiente.

Tabla 7. Resumen de los trabajos sobre diseño de suministro.

Autor	Clasificación	Propuesta	Objetivo	Método
Ho, Lee, y Moodie, (1993)	DM1	Caso teórico	Mejorar el análisis del flujo de material	Optimización basada en heurísticas
Zhuang, Wong, Fuh, y Yee (1998)	DM1	Caso práctico	Evaluar sistemas de montaje complejos	Modelos analíticos y simulación
Alizon, Dallery, Feillet, y Michelon (2007)	DM1	Caso práctico	Diseño de <i>layout</i> eficiente	Optimización basada en heurísticas y marco genérico
Arifin y Egbelu (2000)	DM2	Caso teórico	Desarrollar un modelo analítico para estimar la cantidad de AGVs necesarios	Híbrido. Simulación y modelo analítico con técnicas de regresión.
Ellis, Meller, Wilck, Parikh, y Marchand (2010)	DM2	Caso práctico	Reducir los costes de manejo de materiales globales.	Optimización. Modelos de optimización basados en redes de flujo.
Zheng, He, y Xue (2014)	DM2	Caso teórico	Mejorar la eficiencia del suministro a línea.	Híbrido. Modelos analíticos y simulación
Wang, Guan, Shao, y Ullah (2014)	DM2	Caso práctico.	Obtener una solución que encaje con los requerimientos de la línea de montaje.	Híbrido. Simulación basada en optimización y un algoritmo heurístico.
Battini, Gamberi, Persona, y Sgarbossa (2015)	DM2	Caso teórico	Evaluar la selección del modo de transporte durante el diseño de suministro.	Cualitativo y analítico. Marco conceptual y un modelo analítico.
Savino y Mazza (2015)	DM2	Caso práctico.	Impacto de los principios de diseño de suministro con las técnicas lean.	Cualitativo y analítico. Técnicas <i>lean</i> .
Sáez-Más, García-Sabater, Llorca, y Maheut (2016)	DM2	Caso práctico	Minimizar el tráfico en los pasillos.	Simulación por eventos discretos.
Lehocká, Hlavatý, y Hloch (2016)	DM2	Caso práctico.	Identificar las fuentes de desperdicio durante el suministro.	Cualitativo y analítico. Técnicas <i>lean</i> .

Fuente: Elaboración propia.

3.5 Recepción de material (RP)

La recepción de material en la planta de montaje puede ser en secuencia a través de *conveyors* aéreos (RP1) o a través de los muelles de descarga (RP2). La primera no es relevante en este trabajo porque no genera movimiento de material dentro de la planta. El material se entrega por el aire directamente en el punto de consumo de la línea desde los proveedores próximos a la fábrica OEM. Generalmente son componentes grandes como los asientos, paneles de puertas, paneles de control, etc.

La recepción de material en los muelles implica una sucesión de tareas y requiere una gestión de las actividades que se deben realizar previamente a la recepción. La organización de la planta habrá agrupado las peticiones de material por proveedores para unificar entregas y, a cada proveedor, se les habrá asignado un muelle de descarga. Para nivelar la carga de trabajo también se establecen ventanas horarias. Durante el diseño de las instalaciones, los muelles habrán sido estratégicamente localizados y dimensionados. También los recursos disponibles se habrán estimado para poder atender todas las llegadas, y los medios de manutención disponibles se ajustarán a las necesidades de las operaciones a realizar, que bien pueden ser carretillas elevadoras o remolcadoras según el diseño de suministro deseado.

Una vez llegan los camiones, se debe gestionar la documentación pertinente antes de empezar a descargar. El material descargado se enviará al siguiente punto de la planta, que podrá ser un almacén central o descentralizado.

Todas estas actividades conllevan múltiples problemas de decisión, como son la asignación de proveedores y productos a los muelles, la gestión de los muelles y ventanas horarias, la estimación y asignación de recursos o el diseño de la instalación entre otros. El objetivo de estos problemas suele ser el reducir tiempos, distancia o recursos para reducir así los costes. También cuentan con restricciones de capacidad, distancias, evitar retrasos, congestión, etc. Sin embargo, de acuerdo con los resultados obtenidos en la revisión, no se ha encontrado literatura científica que trate en concreto el tema de la recepción de piezas en muelles a líneas de montaje salvo los vistos en el apartado anterior sobre diseño de instalaciones y de flujo de material.

3.6 Almacenamiento (ST)

El almacenamiento de las piezas en el contexto aquí considerado, incluye las actividades de recepcionar, ubicar, recoger y entregar las piezas una vez recepcionadas en el almacén o área de almacenaje correspondiente a la espera de ser solicitadas en la línea. Una vez entregadas las piezas en el almacén desde los muelles, un operario se encargará de ubicarlas en su posición del almacén. Esta actividad se realiza con carretillas elevadoras ya que el almacenaje se suele realizar en altura para aprovechar mejor las instalaciones.

Posteriormente los carretilleros se encargan de recoger las órdenes de material procedentes de las estaciones de la línea o de otras estaciones de consumo de piezas, localizarlas en el almacén y colocarlas en una zona de selección a la espera que unas flotas de carretillas remolcadoras las lleven al siguiente punto del suministro. Las carretillas remolcadoras pueden agrupar múltiples pedidos y seguir rutas de entrega para reducir las distancias recorridas. La siguiente etapa de suministro podrá ser la propia línea de montaje (ST1) y células de secuenciado o supermercados intermedios (ST2). Sin embargo, no se ha encontrado literatura que trate estas actividades de manipulación de suministro.

Además de estas, existen otras decisiones de carácter estratégico, como son la localización de los almacenes (ST3), la asignación de los productos a cada uno de los almacenes (ST4), la asignación de los productos en las ubicaciones de los almacenes (ST5), la elección de la tecnología de almacenamiento (racks, estanterías dinámicas, etc.) (ST6) y la gestión y estimación recursos (ST7) entre otros.

Alizon, Dallery, Essafi, y Feillet (2009) estudiaron un problema de flujo de material en una planta de ensamblaje final del automóvil. El objetivo principal es evitar un sistema de manejo de materiales poco funcional que pudiera provocar la falta de material en la línea o paradas de esta. Para ello consideran la congestión en la red de pasillos debido a las cargas/descargas de los medios de manutención. Propusieron un método para decidir la asignación óptima de componentes en los almacenes y también dimensionaron la flota de medios de manutención de tal manera que se minimicen los costes de suministro (ST4 + ST7). Mostraron que el uso de las rutas más cortas para diseñar el flujo de material podría conducir a la congestión y que se deberían considerar rutas alternativas más largas para reducir los tiempos totales de transporte. Para ello utilizan un modelo de programación matemática y simulación.

Battini, Faccio, Persona, y Sgarbossa (2010) trabajan la gestión de materiales en entornos de producción ATO (*Assembly To Order*). Su objetivo es minimizar los costes globales de manipulación al indicar para qué categoría de componentes se recomienda adoptar una solución de almacenamiento descentralizada para formar kits de suministro desde un supermercado o si es mejor mantener una centralización completa del componente. En su trabajo los autores consideran múltiples variables críticas para la gestión de componentes para definir el número de almacenes necesarios, tanto centralizados como descentralizados), la localización y la metodología de almacenamiento (ST3 + ST5 + ST7 + SC3). Para ello proponen un modelo de optimización que resuelven con programación lineal.

Kasemset y Rinkham (2011) propusieron un modelo matemático para optimizar la asignación de material en almacenes en un entorno de fabricación (ST4). Los autores comparan el rendimiento, en términos de la distancia diaria total recorrida, de dos políticas de asignación del espacio de almacenamiento. La primera política asigna un solo espacio de almacenamiento a cada proveedor, por lo que todas las piezas que provienen del mismo proveedor se mantienen juntas. Esta política simplifica las operaciones de descarga de camiones y el almacenamiento de productos. La segunda política almacena las partes que se requieren en los mismos puntos de demanda, esta política busca simplificar la selección y distribución de partes.

En la Tabla 8 se han recogido todos los trabajos anteriores donde se aprecia la subcategoría a la que pertenecen, si se trata de un caso de estudio o de un caso práctico, el objetivo y el método de resolución utilizado.

Tabla 8. Resumen de los trabajos sobre almacenamiento.

Autor	Clasificación	Propuesta	Objetivo	Método
Alizon, Dallery, Essafi, y Feillet (2009)	ST4; ST7	Caso práctico.	Diseñar un Sistema de suministro funcional.	Optimización y simulación. Programación matemática y simulación
Battini, Faccio, Persona, y Sgarbossa (2010)	ST3; ST6; ST7; SC3	Caso práctico.	Minimizar costes de manipulación.	Optimización. Programación lineal.
Kasemset y Rinkham (2011)	ST4	Caso practico	Optimizar la asignación de componentes.	Optimización Modelo matemático.

Fuente: Elaboración propia.

3.7 Secuenciado (SC)

La etapa de secuenciado corresponde con aquellos almacenes descentralizados, células o supermercados desde los cuales se organizan las piezas de acuerdo a la secuencia de montaje con el objetivo de reducir el espacio necesario junto a la línea. Las actividades de manipulación y secuenciado se extraen a otras instalaciones.

En estas áreas se suministra material en palés procedentes de los almacenes centrales o bien directamente desde los muelles, y se colocan en una zona de selección donde se prepararán kits de piezas o carros de piezas secuenciadas.

Los operarios prepararán lotes de piezas en otro tipo de embalajes más pequeños al original, como por ejemplo las piezas que se agrupan en kits en secuencia de múltiples piezas, y de tamaño similar.

En el caso de que se quiera enviar piezas secuenciadas, estas se organizarán en carros de una única pieza en todas sus variedades ordenadas según la secuencia. Normalmente en estas células también se realizan pequeñas operaciones de montaje.

Estas etapas intermedias entre el almacén y las estaciones de la línea requieren de una doble manipulación. Esta actividad no supone un valor añadido a la pieza, sin embargo, tienen una serie de ventajas como es el suministro JIT o JIS, además de reducir el espacio necesario junto a la línea.

Las células de *picking* o de secuenciado pueden estar automatizadas y que sea el propio almacén el que entregue de manera automática las piezas a un operario y este las coloque dentro del contenedor (SC1). También puede ocurrir que un operario visite cada posición de la zona de selección para escoger las referencias necesarias para preparar el kit o carro (SC2). Por otra parte, la etapa de secuenciado también conlleva problemas de decisión de tipo macro, como es la localización de estas áreas (SC3) y su diseño o la asignación de piezas (SC4).

Para el primer problema SC1 no se ha encontrado prácticamente literatura. El único trabajo encontrado corresponde con el de Boudella, Sahin, y Dallery (2018), quienes proponen un *kitting* híbrido de lo que se ha definido como SC1 y SC2, es decir, simultáneamente un robot y un operario realizan las actividades dentro de una célula *kitting* de una fábrica de automóviles. El motivo de su propuesta es combinar los beneficios del uso del robot, como es su velocidad, y la de la manipulación manual, ya que los robots no son capaces de manipular bolsas de plástico que recubren algunas de las piezas. Además, las piezas suelen ser pequeñas y el

contenedor también, luego puede ser una actividad compleja para realizar por un robot. El objetivo de su trabajo es asignar de manera óptima los contenedores pequeños a manejar, por el robot y por el operario, para minimizar el tiempo de ciclo total de la célula.

Los problemas más tratados corresponden con los de tipo SC2, donde un operario visita cada posición de la zona de selección para escoger las referencias necesarias para preparar el kit o carro, se presentan a continuación.

Bevilacqua, Ciarapica, y Paciarotti (2012) presentan un proyecto de reingeniería sobre una línea de montaje de automóviles donde el sistema de suministro de material existente se sustituye por un sistema de suministro *kitting*. Todos los pasos de reingeniería se describen en detalle en el documento, donde el fabricante y el proveedor trabajan juntos para optimizar todo el proceso y analizan el beneficio económico y logístico obtenido. Además, los autores analizan el flujo de material y presentan varias ventajas de incorporar el cambio de política de suministro (SC2).

Jainury, Ramli, Rahman, y Omar (2012) presentaron la implementación de un nuevo sistema de suministro de piezas llamado *Set Parts Supply* (SPS) en una línea de ensamblaje con mezcla de modelos de automóviles. Este sistema consiste en unas áreas en las que se seleccionan y ensamblan las piezas para ser posteriormente enviadas en una unidad de carga a la línea de montaje. Este sistema se utiliza para aquellos casos en los que hay una gran variedad de piezas y modelos y se requiere de flexibilidad. Durante el proyecto contemplan aspectos cualitativos y cuantitativos para desarrollar el diseño. Los autores llegaron a la conclusión de que su método aumenta la cantidad de recursos necesarios, pero mejora el control de inventario y la eficiencia del puesto de trabajo (SC2).

Boysen y Emde (2014) presentaron un novedoso concepto logístico al que llaman *line-integrated supermarkets* que tiene como objetivo unificar las ventajas del *kitting* y del almacenamiento en línea. Las piezas se almacenan directamente en la estación y las operaciones de *kitting* las realizan operarios ajenos a la estación de montaje. El objetivo de su trabajo es programar el suministro a los supermercados mediante un enfoque heurístico para minimizar los recursos necesarios (SC2).

Boywitz, Boysen, y Briskorn (2016) trabajan un problema de resecuenciado de los sucesivos contenedores de asientos que llegan a una fábrica de automóviles a una célula especializada. Los autores proponen un modelo de optimización a este problema y desarrollan procedimientos heurísticos para obtener una solución exacta y adecuada. También destacan que introducir pequeñas modificaciones en

el proceso de suministro preestablecido puede repercutir en tráfico para las zonas más congestionadas, de manera que una optimización adicional del proceso de resecuenciación podría contribuir a reducirlo (SC2).

Emde (2017) investiga la reposición de un área de supermercado en una fábrica de automóviles. El autor resuelve el problema de dimensionado y programación de los lotes para minimizar los costes del proceso y manteniendo el tráfico por las instalaciones manejable. Para ello utiliza la programación dinámica y considera aspectos como el área de almacén necesario para determinar cuándo se debe suministrar a un supermercado, con cuantos componentes y la capacidad del vehículo (SC2).

Caputo, Pelagagge, y Salini (2017) desarrollan un modelo cuantitativo para analizar la probabilidad de los errores cometidos y los costes de corrección asociados a estos en la preparación de las entregas de kits a líneas de montaje. El objetivo es identificar los tipos de errores y asesorar el impacto económico del *kitting* en la logística interna (SC2).

Barenji, Ozkaya, y Barenji (2017) investigan el suministro a una línea de montaje real cuyo rendimiento actual no es adecuado. Para ello proponen la implementación de la política de suministro *kitting* y valoran su interés simulando el sistema con redes de Petri. Las redes de Petri se han utilizado como herramienta complementaria para resolver problemas de programación o equilibrado de líneas en entornos de fabricación; sin embargo, no había sido utilizada para analizar suministros *kitting*. Los resultados muestran que es una buena herramienta para valorar posibles ventajas de la implementación de estos sistemas (SC2).

Holmström et al. (2018) investigan el efecto de introducir el modo de suministro a línea *kitting* junto con una fabricación aditiva (AM). La información del *kitting* se puede integrar con la preparación de los datos del diseño digital AM. Los autores presentan todo el proceso de investigación seguido y los ocho experimentos diseñados para analizar el impacto de esta integración en la cadena de suministro. Durante el proceso utilizan herramientas de optimización (SC2).

En cuanto a los trabajos con un enfoque más estratégico de localización (SC3) y diseño de las instalaciones (SC4) se han encontrado los siguientes trabajos.

Emde y Boysen (2012) argumentaron los pros y contras generales del concepto de supermercado y propusieron un modelo matemático para determinar el número óptimo y su ubicación (SC3). El objetivo de su trabajo es minimizar la cantidad de supermercados y la distancia recorrida por todas las rutas efectuadas desde cada

uno de los almacenes en base a su demanda. También apoyaron que dado un diseño de *layout* hay otros factores a considerar como la capacidad de los pasillos de circulación, posibles obstáculos y riesgo de congestión entre otros. Para ello proponen un modelo matemático y presentan un algoritmo de programación dinámica.

Alnahhal y Noche (2015a) adoptan la estrategia de almacenamiento y suministro a líneas de montaje desde almacenes descentralizados o supermercados, los cuales disminuyen el inventario junto a la línea y los costes totales a expensas de incrementar los costes de inversión en ella. En concreto los autores pretenden determinar y localizar los supermercados para minimizar los costes de transporte hasta las estaciones de una línea de montaje con mezcla de modelos y los costes de inventario (SC3 + DL). Para ello proponen un modelo de optimización híbrido basado en programación entera y algoritmos genéticos reales.

Nourmohammadi y Eskandari (2017) propusieron un enfoque de programación matemática de dos niveles para tratar un problema de diseño de la línea de ensamblaje. Consideraron conjuntamente el problema de equilibrado de la línea de montaje (ALBP) y el problema de la ubicación de las áreas de supermercado. El problema de suministro consiste en encontrar el número óptimo de supermercados de un posible número de ubicaciones posibles y también las estaciones a las que debe suministrar cada supermercado (SC3).

Nourmohammadi, Eskandari, y Fathi (2019) destacan que el problema del equilibrado de líneas de montaje (ALBP), no solo afecta a la eficiencia de la línea, sino también a otras decisiones que aparecerán más adelante como es el suministro de la línea. Los autores combinan ambos problemas en un modelo matemático para optimizar la configuración de la línea y el número y la localización de los supermercados necesarios para suministrar la línea (SC3).

Battini, Calzavara, Otto, y Sgarbossa (2017) trabajan simultáneamente el problema de equilibrado de líneas de montaje (ALBP) con el de suministro de material a línea. Los autores proponen un modelo matemático entero mixto con el que buscan sincronizar la asignación de operaciones de la línea con las del supermercado y los costes laborales asociados (SC4). Su objetivo es minimizar la cantidad de recursos asignados a los supermercados y a las estaciones de la línea. Consideran diversas opciones para reducir los costes como por ejemplo mitigar los riesgos ergonómicos en los puestos de trabajo asociados al nivel de ubicación, la repetitividad y la duración de las operaciones.

En la Tabla 9 se han recogido todos los trabajos anteriores donde se aprecia la subcategoría a la que pertenecen, si se trata de un caso de estudio o de un caso práctico, el objetivo y el método de resolución utilizado.

Tabla 9. Resumen de los trabajos sobre áreas de secuenciado.

Autor	Clasificación	Propuesta	Objetivo	Método
Boudella, Sahin, y Dallery (2018)	SC1; SC2	Caso práctico.	Optimizar el tiempo de ciclo de la célula y la asignación de piezas.	Optimización. Programación lineal.
Bevilacqua, Ciarapica, y Paciarotti (2012)	SC2	Caso práctico.	Gestión eficiente del Sistema de suministro.	Cualitativo.
Jainury, Ramli, Rahman, y Omar (2012)	SC2	Caso práctico.	Aumentar la calidad de los envíos de piezas.	Cualitativo.
Boysen y Emde (2014)	SC2	Caso teórico.	Minimizar los recursos necesarios.	Optimización. Programación entera mixta y heurísticas.
Boywitz, Boysen, y Briskorn (2016)	SC2	Caso práctico.	Minimizar el número máximo de elementos almacenados.	Optimización. Programación entera mixta y heurísticas.
Emde (2017)	SC2	Caso teórico.	Minimizar costes de transporte.	Optimización. Programación entera mixta y programación dinámica y heurísticas.
Caputo, Pelagagge, y Salini (2017)	SC2	Caso teórico.	Evaluar las tasas de error de <i>kitting</i> y los costes de corrección de errores.	Modelos analíticos.
Barenji, Ozkaya, y Barenji (2017)	SC2	Caso práctico.	Cuantificar las ventajas del uso de los sistemas <i>kitting</i> .	Simulación. Redes de Petri.
Holmström et al. (2018)	SC2	Caso teórico.	Mostrar los beneficios y costes de producir y suministrar kits de piezas.	Cualitativo.

Autor	Clasificación	Propuesta	Objetivo	Método
Emde y Boysen (2012)	SC3	Caso teórico.	Minimizar la cantidad de supermercados y la distancia recorrida	Optimización. Programación dinámica.
Alnahhal y Noche (2015a)	SC3	Caso teórico.	Minimizar los costes de transporte y elegir la localización de almacenes y gestión de estos.	Optimización programación entera y algoritmos genéticos reales
Nourmohammadi y Eskandari (2017)	SC3	Caso teórico.	Resaltar el efecto del equilibrado de la línea en el problema de localización de los supermercados.	Optimización. Modelo de programación matemática en dos niveles.
Nourmohammadi, Eskandari, y Fathi (2019)	SC3	Caso práctico.	Optimizar la localización de supermercados minimizando las distancias recorridas.	Optimización. Modelo de programación matemática.
Battini, Calzavara, Otto, y Sgarbossa (2017)	SC4	Caso práctico.	Minimizar recursos asignados a los supermercados y estaciones de la línea de montaje.	Optimización. Programación entera mixta.

Fuente: Elaboración propia.

3.8 Determinación de políticas de suministro (SP)

La determinación de las políticas de suministro, que se denominará en adelante SP, recoge diversos problemas de decisión relacionados con el diseño o selección de la política desde un punto de vista más teórico (SP1) y con la implantación o aplicación de dichas políticas a un caso real (SP2).

Varios autores han comparado diferentes políticas, SP1, con el objetivo de encontrar aquella que mejor se adapte a los tipos de productos y mejore el rendimiento del proceso de suministro.

Caputo y Pelagagge (2011) proponen una metodología para ayudar a evaluar y seleccionar la política de suministro de material más interesante. El análisis trata las tres políticas básicas de *kitting*, JIT kanban y almacenamiento en línea, aunque

también considera el uso de políticas híbridas. El principal objetivo es aportar una estimación de recursos y comparar el rendimiento de las diferentes alternativas.

Kilic y Durmusogl (2012) proponen un modelo matemático de programación lineal entera mixta para diseñar un sistema *kitting*. El modelo estima la cantidad de kits y el tiempo de ciclo óptimo que minimice los costes de inventario y el número de operarios a trabajar en él.

Limère, Landeghem, Goetschalckx, Aghezzaf, y McGinnis (2012) destacan la necesidad de una entrega eficiente de piezas en la industria del automóvil debido a la creciente personalización del producto final y de la falta de espacio para almacenar todas las piezas requeridas junto a la línea de montaje. Para ello examinan la relación entre el producto y sus características con el sistema de manejo de materiales óptimo, ya sea en kits o en palés a granel. En su trabajo, desarrollaron un modelo matemático que pretende minimizar los costes de manipulación. Destacaron que preparar kits de todas las piezas no es una forma rentable de mitigar la escasez de espacio junto a la línea, ya que aumenta considerablemente los costes. De este modo, se deben analizar las piezas y seleccionar aquellas que sea interesante agrupar en kits. Los autores presentan algunas recomendaciones para realizar esta selección.

Faccio (2014) analiza las diferentes políticas existentes considerando la variación del mix de producción y el efecto de variedad de los modelos ensamblados en la línea. Su enfoque apunta a encontrar la política de alimentación óptima de acuerdo con una comparación entre las funciones de coste de cada una de las políticas *kanban*, *kitting* e híbridas.

Bortolini, Ferrari, Gamberi, Manzini, y Regattieri (2015) presentan un modelo matemático de costes para el diseño de un sistema de suministro a líneas de montaje con mezcla de modelos mediante carretillas remolcadoras para el suministro *kanban*. El objetivo del modelo es minimizar los costes asociados a la flota de carretillas, inventario y los retrasos en el suministro. El modelo se valida en un caso real de un fabricante de automóviles. Los autores destacan como resultados que este modelo es más efectivo en comparación con los ya existentes en la literatura.

Sali, Sahin, y Patchong (2015) investigan las diferencias de coste entre el *kitting*, almacenamiento en línea, y secuenciado en el sector del automóvil. Los autores destacan que es un área de trabajo que está tomando cada vez más interés en la literatura, pero, sin embargo, pocos de trabajos realizan una comparación

cuantitativa. Para ello proponen un modelo de costes que resuelven analíticamente y con el que plantean más de 90,000 escenarios con diferentes combinaciones de parámetros como el número de variantes, el coeficiente de la BOM, que definen como el número de piezas necesarias para realizar un ensamblaje, la tasa de inutilización/ utilización, que es el porcentaje de producto final que no utiliza ninguna de las variantes del componente y el tamaño de lote. Finalmente destacan que la política *kitting* tiene un buen rendimiento para aquellos componentes pequeños con una gran variedad, el almacenamiento en línea, para componentes de mayor volumen y baja diversidad, y el secuenciado para componentes grandes de gran diversidad.

Caputo, Pelagagge, y Salini, (2015) se interesan por la decisión de qué política de suministro seleccionar entre *kitting*, el almacenamiento en línea y las entregas JIT. Todas ellas tienen unas ventajas y desventajas sobre las otras, por lo que es difícil compararlas entre sí. Para ello, los autores proponen un modelo basado en costes en los que consideran diferentes aspectos como el coste por hora y operario, el coste de almacenamiento y la demanda. Los autores demuestran que las características de las piezas juegan un papel muy importante a la hora de determinar los costes de suministros y seleccionar la política más adecuada. Por otra parte, también destacaron que una política considerada óptima para un tipo de característica, no tiene por qué serlo para otras características.

Limère, Van Landeghem, y Goetschalckx (2015) proponen un modelo de programación lineal entera mixta para decidir entre una política de suministro a líneas de montaje de tipo *kitting* o de almacenamiento en línea. Los autores consideran el impacto de las distancias recorridas por el operario durante la selección en línea, así como que no solo tendrá un impacto en la elección entre ambas políticas el flujo de la logística interna, sino también la cantidad de stock disponible junto a la línea. En sus resultados presentan un análisis para demostrar que las características físicas de los componentes influyen en la decisión de empaquetar en kits las piezas o no.

Sali y Sahin (2016) presentan un modelo matemático para seleccionar el modo de alimentación más eficiente a líneas de montaje para cada componente individual, creación de kits, entregas secuenciadas o el almacenamiento de línea. Su objetivo era minimizar los costes operativos totales del proceso. En sus resultados muestran que el tamaño del contenedor de los kits y el espacio junto a la línea tiene un impacto significativo en el coste total del suministro. El modelo alcanza un punto de

equilibrio para políticas híbridas donde, aunque se aumente el espacio junto a la línea el volumen del contenedor del kit se mantiene.

Zammori et al. (2016) dimensionan un sistema de suministro JIT a una línea de montaje caracterizada por almacenar los componentes en áreas periféricas a la planta, en la que no es posible realizar cambios sobre el *layout* y donde se tiene que cambiar de un sistema *push* a uno *pull*. Es por ello que los autores proponen dos alternativas para mejorar el flujo de material basados en un modelo matemático, con el que dimensionan el suministro a línea. También utilizan la probabilidad bayesiana para mostrar en los resultados el potencial del modelo propuesto.

Usta, Oksuz, y Durmusoglu (2017) estudian la selección de las políticas de suministro de piezas, considerando la opción del *kitting* y del almacenamiento en línea. Su estudio está formado por dos etapas, en la primera consiste en realizar un análisis y agrupar por *clusters* las piezas, y la segunda etapa comparan y evalúan las diferentes políticas según un análisis ABC de los productos. Los autores destacan que un único suministro de tipo *kitting* es muy caro en sistemas con mezcla de modelos, por lo que el uso de políticas híbridas puede ser una mejor solución para estos sistemas.

Además de los anteriores trabajos, otros autores trabajan la implementación de las diferentes políticas a líneas de montaje en plantas reales, SP2.

Raju et al. (1997) trabajan en el modelado, la simulación y la implementación del suministro JIT en un sistema de montaje. Para ello realizan una simulación para analizar el sistema kanban y la reacción del sistema ante diferentes cambios en los parámetros.

Sianesi (1998) trabajan el suministro de piezas kanban, para las cuales deben de definir todo el proceso de suministro interno, donde definen parámetros como el tamaño del contenedor, el tamaño del buffer, la frecuencia etc. En su trabajo describen un modelo lógico para optimizar todos los parámetros kanban mediante un modelo de simulación.

de Souza, de Carvalho, y Brizon (2008) presentan una aplicación real de alimentación a líneas de montaje en una fábrica de automóviles, que consiste en empaquetar las piezas en contenedores para cubrir con los requerimientos de las estaciones de trabajo y minimizar los costes totales de manipulación. Este problema requiere de estimar el tamaño del contenedor y de una estructura de costes variable según el empaquetado de las piezas. Los autores utilizan un modelo de programación entera y heurísticas para encontrar una solución al suministro.

Wagner y Silveira-Camargos (2011) destacan el reto que supone para los sistemas de producción JIT el incremento del número de variantes, en cuanto a las consecuencias por la compleja gestión de los costes y conceptos logísticos como es el JIS. De este modo, en su trabajo proponen un modelo matemático basado en costes que facilite el proceso de toma de decisiones para la aplicación de JIS tomando de partida unas características de variedad, valor y complejidad logística. El objetivo de su trabajo es proporcionar resultados sobre la práctica JIS y su aplicabilidad a otras industrias.

Hanson y Brolin (2013) presentan dos casos de estudio en el sector del automóvil en el que el suministro de material a línea se realiza bajo una política de almacenamiento en línea. Para mejorar el rendimiento del suministro implementan en ambos casos una política *kitting* para algunas de las referencias. A lo largo del documento presentan el caso de estudio y describen el proceso de diseño de presentación de las piezas y el diseño de suministro de material. Finalmente comparan el rendimiento de ambas políticas y cómo afecta cada una a las horas de trabajo, la calidad del producto, la flexibilidad, el nivel de inventario y los requerimientos de espacio.

Jainury et al. (2014) se preocuparon por la gran variedad de partes a gestionar en una línea de montaje y la importancia del control del flujo de material para asegurar el correcto funcionamiento de la línea. En su trabajo presentan un sistema de suministro para líneas de montaje con mezcla de modelos introducido en Toyota y llamado *Set Parts Supply* (SPS). El objetivo de su investigación es implementar este sistema en un caso real y ver su enlace con el sistema de ejecución de la producción, el cual se sincroniza con el suministro de piezas, el sistema e-kanban y la hoja de suministro.

Lolli, Gamberini, Giberti, Rimini, y Bondi (2016) se centran en evaluar las políticas de suministro desde supermercados a una línea de montaje modificando el número de rutas kanban simultáneas. El caso de estudio planteado corresponde con una planta de automóviles en la que realizan el suministro continuo mediante carretillas elevadoras. Para ello proponen un modelo analítico de costes y simulación para estimar los operarios mínimos para garantizar el suministro y prevenir paradas en línea y los costes mínimos.

Ezema, Okafor, y Okezie (2017) implementan un sistema JIT basado en tarjetas kanban con el objetivo de reducir el *lead time*, reducir el inventario de los buffers finales, mejorar la gestión visual y la motivación de los operarios. Los autores

desvelan que el diseño de sistemas JIT puede afectar de manera significativa a los medibles de rendimiento de la producción en cuanto al inventario y los costes.

Tabla 10. Resumen de los trabajos sobre la determinación de las políticas de suministro.

Autor	Clasificación	Propuesta	Objetivo	Método
Caputo y Pelagagge (2011)	SP1	Caso práctico.	Ayudar en la selección de políticas de suministro.	Analítico.
Kilic y Durmusogl (2012)	SP1	Caso teórico.	Proponer un modelo matemático para el diseño de sistemas <i>kitting</i> .	Optimización. Programación lineal entera mixta.
Limère, Landeghem, Goetschalckx, Aghezzaf, y McGinnis (2012)	SP1	Caso práctico.	Seleccionar la mejor política que minimice los costes totales de manipulación.	Optimización. Programación entera mixta.
Faccio (2014)	SP1	Caso práctico.	Minimizar los costes de suministro.	Simulación.
Bortolini, Ferrari, Gamberi, Manzini, y Regattieri (2015)	SP1	Caso práctico.	Estimar el tamaño de la flota y los niveles de inventario minimizando los costes de manipulación.	Modelo analítico.
Sali, Sahin, y Patchong (2015)	SP1	Caso teórico.	Comparar el rendimiento y los costes de las políticas de suministro.	Modelo analítico.
Caputo et al. (2015a)	SP1	Caso teórico.	Proponer un modelo matemático para seleccionar la política de suministro que minimice los costes.	Optimización. Programación matemático lineal entera.
Limère, Van Landeghem, y Goetschalckx (2015)	SP1	Caso teórico.	Proponer un modelo de decisión de diferentes políticas que considere las distancias recorridas por los operarios.	Optimización. Programación matemático lineal entera mixta.
Sali y Sahin (2016)	SP1	Caso práctico.	Proponer un modelo de decisión de diferentes políticas que minimice los costes logísticos (operaciones, transporte, preparación, etc.).	Optimización. Programación entera mixta.

Autor	Clasificación	Propuesta	Objetivo	Método
Zammori et al. (2016)	SP1	Caso teórico.	Racionalizar el flujo de materiales y reducir el trabajo en proceso durante el suministro.	Modelo analítico.
Usta, Oksuz, y Durmusoglu (2017)	SP1	Caso teórico.	Diseñar y decidir el sistema de suministro.	Modelos analíticos y cualitativos.
Raju et al. (1997)	SP2	Caso práctico.	Establecer redes de prioridad para el modelado y análisis de sistemas de fabricación JIT.	Simulación.
Sianesi (1998)	SP2	Caso práctico.	Diseñar el suministro kanban	Simulación.
de Souza, de Carvalho, y Brizon (2008)	SP2	Caso práctico	Minimizar los costes totales de manipulación	Optimización. Programación entera basada en heurísticas.
Wagner y Silveira-Camargos (2011)	SP2	Caso teórico.	Recomendaciones sobre en qué situaciones es mejor utilizar estrategias JIT o JIS.	Cualitativo.
Hanson y Brolin (2013)	SP2	Caso práctico.	Proporcionar una visión de los efectos del <i>kitting</i> y del almacenamiento en línea.	Cualitativo.
Jainury et al. (2014)	SP2	Caso práctico.	Implementar una nueva política de suministro en una línea de montaje.	Cualitativo.
Lolli, Gamberini, Giberti, Rimini, y Bondi (2016)	SP2	Caso práctico.	Minimizar el número de operarios.	Simulación y modelos analíticos.
Ezema, Okafor, y Okezie (2017)	SP2	Caso práctico.	Implementar un sistema JIT.	Modelos analíticos.

Fuente: Elaboración propia.

3.9 Envíos a línea (DL)

Una vez seleccionado el tipo de política a utilizar para cada tipo de referencia, se deben de tomar las decisiones que conlleva la puesta en marcha de los envíos a línea (DL). Las entregas a línea corresponden con el movimiento de material desde un

almacén central o descentralizado hasta su punto de consumo en la línea de montaje.

En concreto, se van a considerar varios de los problemas de decisión que surgen a la hora de decidir qué piezas se tienen que enviar a qué estaciones, en qué cantidad y en qué medio de manutención. Los problemas de decisión se identificaron en el trabajo de Boysen et al. (2015) y fueron los siguientes:

- La asignación de tareas a los medios de manutención (DL1).
- La secuenciación de tareas y contenedores durante el envío (DL2).
- La carga de material en los elementos de manutención (DL3).
- La ruta de suministro predeterminada para cada estación de montaje (DL4).
- La programación de los envíos a largo del día (DL5).

Kozan (2000) integra el sistema de manejo de materiales con las operaciones logísticas de una planta de montaje de camiones en la cual quieren decidir dónde ubicar los almacenes y la programación de las entregas desde el almacén hasta a línea de montaje para incrementar la eficiencia del transporte (DL1 + DL2 + ST3). Propone un modelo matemático y una heurística con el objetivo de reducir el tiempo de manipulación de los componentes y permitir una mayor flexibilidad de la recogida de los componentes.

Golz, Gujjula, Günther, Rinderer, y Ziegler (2012) abordaron el problema del suministro interno de piezas desde un almacén central a las estaciones de una línea de montaje con mezcla de modelos de automóviles. El objetivo es minimizar la cantidad de conductores necesarios para llevar a cabo el proceso de suministro. Con ese objetivo, los autores proponen una solución heurística en la que el problema se descompone en dos partes. La primera considera todas las órdenes de transporte de la secuencia de la línea de ensamblaje, y la segunda asigna las órdenes a los recorridos de enlace (DL1 + DL2). Con el enfoque propuesto, los autores logran ahorros de costes al reducir el número de conductores y, lo que es más importante, redujeron el riesgo de paradas de línea debido a estaciones sin piezas.

Sternatz (2015) analiza las interdependencias entre el problema de equilibrado de líneas y el problema de determinar el suministro de material en un modelo de optimización que asigna la cantidad de contenedores necesarios a las estaciones para realizar el suministro de acuerdo a los costes operacionales del sistema de trabajo y al espacio limitado junto a las estaciones de montaje (DL1). Para ello proponen un modelo matemático y una heurística.

La carga de las entregas a línea es otro de los problemas tratados en la literatura, como por ejemplo determinar qué cantidad de unidades de carga cargar por viaje o qué cantidad descargar en cada estación entre otros (DL3).

Hwang, Kim, y Moon (1996) determinaron la unidad de carga óptima para una flota de AGV en una línea de montaje de componentes electrónicos (DL3). Se sugieren dos políticas de trabajo para las que los autores proponen un modelo matemático diferente, que asume que los AGV entregan las piezas desde un ASRS hasta cada una de las estaciones de montaje.

Braglia (2001) proponen un modelo analítico basado en teoría de colas para dimensionar la cantidad de medios de manutención necesarios para abastecer una línea de montaje mono producto que sigue la filosofía JIT. Este modelo también permite reajustar la capacidad de los contenedores para reducir la variación de tiempos entre las peticiones de material desde la línea (DL3). Los autores destacan que este modelo también se podría aplicar a líneas de montaje con mezcla de modelos, pero que, por una parte, sería más difícil al tener que conocer de antemano la secuencia de montaje, y por otra, la media y desviación cambiarán a lo largo del tiempo por las diferentes ratios de consumo de los componentes.

Neumann y Medbo (2010) presentan una comparación de las estrategias de suministro en cajas grandes y pequeñas en la que evaluaron los requerimientos de espacio, las distancias recorridas y el rendimiento. Los resultados de la simulación muestran que, el uso de cajas pequeñas reduce de manera significativa algunas de estas variables, mejora la productividad, permitiendo un empaclado mucho más flexible (DL3). Todo esto mejora el esfuerzo ergonómico de los operarios de las estaciones y puede ayudar a reducir el uso de carretillas elevadoras, reduciendo los riesgos a los que están sometidos los operarios.

Emde, Fliedner, y Boysen (2012) investigaron el problema de carga de carretillas remolcadoras para minimizar el inventario junto a la línea y evitar la falta de este durante la producción (DL3). Los autores concluyen que aumentar la frecuencia en sus entregas consigue reducir el inventario junto a la línea o requiere de menos contenedores por tren.

Hanson, Finnsgard, y Finnsgård (2014) tratan el tema de la eficiencia durante el suministro de materiales en planta y el efecto que tiene sobre esta el tamaño de las unidades de carga. Plantean un caso de estudio de una línea de montaje de automóviles que refleja que la relación entre ambas no es proporcional. En los resultados confirman la relación directa que tiene la unidad de carga sobre la

eficiencia del suministro de material en planta, así como un efecto indirecto sobre la configuración del suministro de este (DL3).

Staab, Klenk, Galka, y Guentner (2016) realizan un modelo de simulación sobre el suministro mediante *milk-run* a una línea de montaje del sector del automóvil. Durante el diseño consideran los procesos de carga, entregas y adelantamientos entre las carretillas en los pasillos, así como la variación de la demanda, y diferentes combinaciones para considerar la situación del tráfico actual y el nivel de servicio (DL3). Proponen medibles para asegurar el suministro y encontrar puntos conflictivos de tráfico a esquivar antes de tomar decisiones durante el transporte.

La gestión de las rutas durante las entregas a línea es otro de los problemas tratados en la literatura (DL4).

Choi y Lee (2002) diseñan un sistema de suministro de piezas dinámico para reemplazar uno existente estático. El nuevo sistema estimará el consumo de piezas automáticamente en función de la producción actual en la línea y creará las rutas necesarias para suministrar el material demandado (DL4). Para ello utilizan la simulación, ya que proporciona los resultados del sistema dinámico son mejores que los resultados de la estimación estática.

Chuah y Yingling (2005) presentan un enfoque de optimización para el diseño de rutas de transporte JIT desde los proveedores hasta el punto de consumo en una planta de montaje. En algunos de los envíos, las entregas van directas desde el muelle de descarga hasta los puntos de consumo, y en cambio, otras experimentan una doble manipulación al tener que pasar por los almacenes intermedios. Este enfoque también define los tiempos de las rutas y la frecuencia (DL4). La solución propuesta satisface algunas de las restricciones de la planta, como considerar los envíos de alta y baja frecuencia y la limitación del espacio en los almacenes.

Zenker, Emde, y Boysen (2016) estudian el llamado *inventory routing problem* (IRP) que combina dos problemas importantes de la gestión del suministro, como son el control de inventario y el transporte desde los llamados supermercados hasta la línea de montaje (DL4). Para ello utilizan un modelo de optimización.

Korytkowski y Karkoszka (2016) estudian el suministro desde un almacén hasta una línea de montaje a través de una ruta *milk-run* (DL4). Se busca ver la eficiencia y el impacto de la ruta en la línea de montaje. Para ello los autores desarrollan un modelo de simulación por eventos discretos con el analizan diversos tipos de interrupciones en el entorno de producción, en la gestión de las decisiones o en la estabilidad y rendimiento de la producción. En sus resultados muestran que los

sistemas *milk-run* se recuperan rápidamente de problemas graves y de retrasos en el suministro, lo cual supuso menos de un 15 % de impacto en el rendimiento en los casos más extremos. Por el contrario, las pequeñas interferencias no tienen un efecto significativo en el rendimiento de la línea.

Zhou y Tan (2018) tratan el problema de optimizar las rutas de suministro desde los supermercados hasta las estaciones de la línea de montaje con medios de manutención eléctricos, los cuales tienen la restricción de que durante su trayecto deben visitar las estaciones de carga para recargar la batería y cambiarla. Además de las rutas, los autores pretenden decidir la localización estratégica de estas estaciones de carga para interferir lo menos posible en la eficiencia del transporte (SP3 + DL4).

Emde y Schneider (2018) estudian el problema de rutas de suministro de piezas JIT desde un supermercado a líneas de montaje (DL4), al que llaman “*just-in-time capacitated VRP*” (JITCVRP). Las carretillas remolcadoras realizan la ruta asignada cíclicamente sin parar y entregando la cantidad requerida a cada estación para que pueda trabajar hasta la siguiente visita de la ruta. El objetivo de su trabajo es minimizar la cantidad de vehículos, la duración total de la ruta y la frecuencia de visitas que recibe cada estación. Para ello proponen un modelo matemático y un algoritmo de búsqueda local.

Satoglu y Sipahioglu (2018) se preocupan por el diseño de sistemas *milk-run*, los cuales para evitar la falta de material en línea y ajustarse a todas las restricciones del sistema, se debe de diseñar de manera que haya un equilibrio y unos costes mínimos durante el transporte y el inventario en línea. De esta manera integran el problema de *inventory routing problem* (IRP) con la asignación de estaciones a rutas (DL4). Para encontrar una solución a este problema, los autores proponen un modelo matemático que optimiza la asignación y el tiempo de servicio mientras que minimiza el coste total de manejo de materiales y de inventario.

Una vez establecida la ruta a realizar por los elementos de manutención, se suele estudiar la programación de estas, es decir, con qué frecuencia y en qué momento deben de salir para comenzar el suministro.

Hao y Shen (2008) proponen un modelo basado en simulación por eventos discretos y agentes para simular el manejo de materiales a una línea de montaje. Con ayuda del sistema propuesto son capaces de programar el suministro, evaluar su rendimiento y proponer posibles escenarios de mejora (DL5).

Boysen, Fliedner, y Scholl (2009) muestran dos modelos sobre cómo adoptar un nivel de programación para agrupar envíos mediante optimización (DL5). El primero de ellos trata de nivelar las piezas para un programa de entregas dado. El segundo intenta distribuir los eventos de entrega uniformemente en el horizonte de planificación para cantidades de entrega determinadas (tamaños de contenedores).

Torabi y Jenabi (2009) utilizan un enfoque para resolver el problema del lote económico y la programación de entregas en líneas de montaje en un horizonte de planificación finito (DL5). Los autores utilizan un modelo de programación matemática para minimizar los costes de set-up, de inventario y de envío.

Vukovic, Ikonc, y Mikac (2009) presentan un proceso de optimización para probar la utilidad de una nueva programación del aprovisionamiento y minimizar los costes logísticos asociados (DL5). A lo largo del trabajo presentan todos los pasos necesarios para planificar un sistema de gestión de inventario (*inventory management system*) para un entorno de montaje.

Boysen y Bock (2011) investigan el suministro de material a líneas de montaje con mezcla de modelos, donde les preocupa que una mala gestión de la distribución mediante carretillas elevadoras pueda obligar a parar la línea. Para ello tratan de programar el suministro de cajas de material que llegan desde un almacén central mediante un puente grúa, a partir de ahí una flota de carretillas elevadoras se encargan del suministro (DL5). Los autores utilizan optimización y simulación con el objetivo de determinar la secuencia de las cajas para satisfacer la demanda, mientras minimizan la cantidad máxima de inventario junto a la línea en todas las estaciones y ciclos de producción. Este problema surge de una aplicación real en la industria del automóvil.

Chang, Pan, Xiao, y Biller (2013) destacan la estrecha relación entre el sistema de manejo de materiales y el sistema de producción en plantas de automóviles. Sin embargo, la literatura tiende a separar ambos temas e ignorar el efecto crítico que tienen la una sobre la otra en cuanto a eficiencia y coste. De este modo, los autores proponen un enfoque de modelado matemático utilizando un algoritmo max-plus para integrar ambos sistemas con el que estudian con detenimiento el control de la producción en tiempo real, la programación de los envíos, los cambios en los eventos de pedido y estimar los carretilleros necesarios (DL5).

Rao, Wang, Wang, y Wu (2013) estudian el problema de programación de vehículos de suministro JIT a líneas de montaje con mezcla de modelos, donde todas las partes se entregan desde un almacén central (DL5). El problema planteado está basado en

una situación real de la industria del automóvil. Los autores proponen un modelo de optimización del que destacan cuatro propiedades de factibilidad, como son definir el tiempo de salida óptimo, la cantidad de cargas acumuladas está restringida, establecer límites mínimos para los tiempos de salida y una restricción de pedidos.

Hund, Rochow, Mach, y Nyhuis (2016) evalúan cuantitativamente las acciones de mejora para la sincronización de los tiempos durante el suministro de piezas en entornos de montaje (DL5). Para ello desarrollan un nuevo concepto al que llaman factor de sincronicidad, con el que comparan diferentes períodos de tiempo. El objetivo es poder llegar a comparar diversos modos de suministro con ayuda de este modelo.

Emde y Gendreau (2017) investigan el problema de la programación de los TT de transporte en planta para alimentar líneas de montaje con mezcla de modelos bajo una filosofía JIT (DL5). Los autores proponen un modelo MIP y una heurística de descomposición. En sus resultados destacan que los programas de suministro cíclico que se aplican en las industrias son extremadamente ineficientes. Además de esto, la falta de espacio en línea y la necesidad de reducir el inventario en proceso tendrían que resultar una motivación para futuros trabajos de investigación y gerentes de las plantas.

Zhou y Peng (2017) investigan la programación del suministro interno de piezas en una línea de montaje de automóviles siguiendo un principio JIT (DL5). Proponen un modelo matemático que combina un problema de rutas y carga con el objetivo de minimizar los niveles de inventario del lado de la línea.

Peng y Zhou (2018) investigan el problema de la programación de múltiples servidores (MSSP) junto con el suministro de piezas JIT a líneas de montaje de automóviles (DL5). Las piezas se almacenan en cajas y son enviadas desde los supermercados hasta las estaciones con el objetivo de minimizar el inventario junto a la línea. Los autores desarrollan un modelo híbrido MILP junto con dos optimizadores locales, los cuales permiten encontrar soluciones óptimas al problema en un tiempo de computación limitado.

Aunque los problemas de carga, rutas y programación se han tratado de manera independiente en la literatura, una parte de trabajos agrupan 2 o 3 de estos problemas de decisión en un único trabajo.

Agnetis et al. (1997) presentan el problema de flujo de material de una planta de montaje de automóviles en la que el movimiento de material es complejo y está automatizado con AGV. En ella se requiere de una programación y control de las rutas (DL4 + DL5). Los autores utilizan la simulación para validar varios escenarios y modelos de decisión, en los que los parámetros de salida a evaluar son el tiempo de ciclo del circuito de reparto de los AGV, tiempo de flujo desde que se libera el producto hasta que está disponible, la cantidad de componentes que llegan tarde a su punto de consumo y la eficiencia de producción de la línea de montaje.

Emde y Boysen (2012b) optimizan un problema de rutas y programación de una flota de carretillas remolcadoras que suministran una línea de montaje de automóviles con mezcla de modelos desde supermercados (DL4 + DL5). Además de esto, los autores gestionan la compensación entre el número y capacidad de las carretillas remolcadoras y el inventario junto a la línea.

Faccio, Gamberi, y Persona (2013) proponen un modelo para optimizar el número de *kanbans* en un supermercado que garantice la alimentación de piezas a una línea de montaje con mezcla de modelos. De este problema se centran en estimar la cantidad de operarios a asignar en cada ruta y la carga de contenedores por viaje que minimice el inventario en línea y la falta de material (DL3 + DL4). Los autores destacan que su modelo es capaz de reducir los costes totales de la compañía en un 35% y que aumentar el número de operarios ayuda a reducir el tiempo medio de suministro para aumentar el nivel de servicio.

Alnahhal y Noche (2013) utilizan la programación entera mixta (MIP) y la Programación dinámica (DP) para estudiar el proceso de alimentación usando rutas *milk-run* con carretillas remolcadoras desde supermercados descentralizados hasta las estaciones de la línea de montaje con mezcla de modelos. Los autores investigan los problemas de programación, rutas y carga de los remolcadores (DL3 + DL4 + DL5). El objetivo del estudio es minimizar los costes de inventario, reducir la variabilidad del sistema en la carga y en la longitud de las rutas y reducir los recursos necesarios.

Satoglu y Sahin (2013) desarrollaron un modelo matemático con un enfoque heurístico para construir rutas, hacer la programación y la carga de los elementos de manutención y determinar así el nivel de servicio para un sistema de suministro *milk-run* desde un almacén central hasta una línea de montaje (DL3 + DL4 + DL5). Buscan minimizar los costes totales de manejo de material y mantenimiento de inventario para el diseño de un sistema interno de suministro de material de producción de leche que alimenta una línea de ensamblaje de modelos mixtos.

Fathi, Rodriguez, y Alvarez (2014) estudian el problema de suministro de piezas a líneas de montaje (ALPFP) el cual engloba una serie de decisiones como es la selección de piezas que se debe entregar en cada momento y en la cantidad exacta en cada estación. El propósito de este trabajo es evitar la falta de piezas en línea con un suministro JIT minimizando la cantidad de viajes y el nivel de inventario. Proponen un algoritmo de optimización de colonia de hormigas para optimizar la carga y la programación de los envíos (DL3 + DL5). Los autores destacaron que, hasta el momento, no se habían encontrado en la literatura modelos con su complejidad, es decir, que incluya todas sus restricciones y que minimicen la cantidad de recorridos y nivel de inventario simultáneamente.

Dong, Zhang, Xiao, y Li (2015) destacan la gran dificultad que supone el manejo de materiales en la producción moderna. Investigan los envíos de piezas a líneas de montaje con mezcla de modelos desde supermercados descentralizados mediante TT. Para ello utilizan una estrategia de entregas dinámicas basada en una heurística que programa las rutas, horas de salida, cantidad de cargas por viaje, etc. (DL3 + DL4 + DL5). A diferencia de otros trabajos, consideran pequeñas alteraciones que desajustan las entregas, como son los fallos de las carretillas remolcadoras o cambios en la secuencia de montaje.

Alnahhal y Noche (2015b) investigaron el control del flujo de material en líneas de montaje con mezcla de modelos, en concreto el uso de trenes remolcadores para alimentar la línea desde almacenes o supermercados. Tratan el problema de rutas, programación y carga considerando posibles interrupciones del proceso como paradas de roturas de máquina, paradas de la línea, piezas defectuosas o el resecuenciado de la línea (DL3 + DL4 + DL5). Para ello utilizan métodos analíticos y programación entera para minimizar el tiempo total requerido durante el proceso de suministro.

Dong, Zhang, y Xiao (2016) propusieron un sistema de suministro JIT utilizando supermercados descentralizados con el que programar las rutas de las carretillas remolcadores y las entregas, además de minimizar la cantidad de carretilleros y el tiempo de transporte necesario (DL4 + DL5). El objetivo final es asegurar que las estaciones no se queden sin material. Para ello utilizan programación matemática y programación dinámica.

Fathi, Rodriguez, Fontes, y Alvarez (2016) trabajan en el problema de alimentación de piezas a línea de montaje, el cual describen como un problema de optimización combinatoria de gran complejidad en el que se debe decidir qué pieza y qué

cantidad enviar en cada ruta para garantizar la entrega de las piezas a cada estación de la línea (DL3 + DL4 + DL5). En primer lugar, proponen un modelo de programación lineal entero mixto multiobjetivo, al que después le aplican un algoritmo de optimización por enjambre de partículas (MPSO). El objetivo de este trabajo es minimizar la cantidad de rutas efectuadas y los costes asociados a estas, así como minimizar el inventario en línea debido a la limitación de espacio junto a la línea en las plantas actuales.

Tabla 11. Resumen de los trabajos sobre las entregas a línea.

Autor	Clasificación	Propuesta	Objetivo	Método
Kozan (2000)	DL1; DL2; ST3	Caso práctico.	Reducir tiempo de operación.	Optimización. programación lineal entera mixta.
Golz, Gujjula, Günther, Rinderer, y Ziegler (2012)	DL1; DL2	Caso práctico.	Minimizar la cantidad de operario.	Optimización. Programación lineal entera mixta.
Sternatz (2015)	DL1	Caso práctico.	Minimizar los tiempos totales por pedido.	Optimización. Modelo matemático y heurística.
Hwang, Kim, y Moon (1996)	DL3	Caso práctico.	Minimizar los costes de transporte.	Optimización. Modelo matemático no lineal.
Braglia (2001)	DL3	Caso práctico.	Dimensionar la flota de carretillas.	Modelo analítico.
Neumann y Medbo (2010)	DL3	Caso teórico.	Presentar un modelo de comparación entre el uso de contenedores pequeños y grandes para suministrar.	Cualitativo y analítico.
Emde, Fliedner, y Boysen (2012)	DL3	Caso teórico.	Minimizar el inventario junto a la línea.	Optimización. Modelo matemático.
Hanson, Finnsgard, y Finnsgård (2014)	DL3	Caso práctico.	Reducir los tiempos de preparación y conseguir que el material en la línea esté más compacto.	Cualitativo.
Staab, Klenk, Galka, y Guentner (2016)	DL3	Caso práctico.	Mostrar los bloqueos en el suministro y su frecuencia.	Simulación por eventos discretos.
Choi y Lee (2002)	DL4	Caso práctico.	Diseñar un nuevo sistema de suministro dinámico.	Simulación.

Modelos y métodos para el análisis, diseño y evaluación de la logística interna de aprovisionamiento a líneas de montaje con mezcla de modelos en fabricación de automóviles

Autor	Clasificación	Propuesta	Objetivo	Método
Chuah y Yingling (2005)	DL4	Caso teórico.	Minimizar los costes de transporte, inventario y transporte hasta el punto de consumo.	Optimización. Programación no lineal entera mixta y programación dinámica.
Zenker, Emde, y Boysen (2016)	DL4	Caso teórico.	Minimizar los costes de transporte.	Optimización. Programación dinámica.
Korytkowski y Karkoszka (2016)	DL4; SC3	Caso práctico.	Influencia del comportamiento del operario de la ruta con los parámetros de las rutas <i>milk-run</i> .	Simulación por eventos discretos.
Zhou y Tan (2018)	DL4	Caso teórico.	Determinar la planificación de las rutas y la localización de las estaciones de carga.	Optimización y simulación. Programación dinámica.
Emde y Schneider (2018)	DL4	Caso teórico.	Minimizar la flota de vehículos y la duración de la ruta.	Optimización. Programación lineal entera mixta.
Satoglu y Sipahioglu (2018)	DL4	Caso teórico.	Minimizar el coste total de manejo de materiales y de inventario.	Optimización. Programación entera mixta.
Hao y Shen (2008)	DL5	Caso práctico.	Optimizar el flujo de transporte de materiales.	Simulación por eventos discretos y agentes.
Boysen, Fliedner, y Scholl (2009)	DL5	Caso teórico.	Adoptar una idea de programación para las políticas JIT.	Optimización. Programación dinámica y algoritmo de recocido simulado.
Torabi y Jenabi (2009)	DL5	Caso teórico.	Minimizar el inventario, y el coste de suministro.	Optimización. Modelo de programación no lineal.
Vukovic, Ikonc, y Mikac (2009)	DL5	Caso práctico.	Minimizar los costes logísticos	Método empírico-matemático.
Boysen y Bock (2011)	DL5	Caso práctico.	Minimizar la cantidad máxima de inventario junto a la línea	Optimización y simulación. Programación dinámica.
Chang, Pan, Xiao, y Biller (2013)	DL5	Caso práctico.	Desarrollar un enfoque de modelado que integre el sistema de producción con el sistema de manejo de materiales en tiempo real.	Optimización. Modelo matemático.

Modelos y métodos para el análisis, diseño y evaluación de la logística interna de aprovisionamiento a líneas de montaje con mezcla de modelos en fabricación de automóviles

Autor	Clasificación	Propuesta	Objetivo	Método
Rao, Wang, Wang, y Wu (2013)	DL5	Caso práctico.	Entregar eficientemente el material para evitar paradas de la línea.	Optimización. Algoritmos genéticos y simulación recocida.
Hund, Rochow, Mach, y Nyhuis (2016)	DL5	Caso teórico.	Evaluar la coordinación de los procesos de suministro.	Optimización.
Emde y Gendreau (2017)	DL5	Caso teórico.	Ayudar en la toma de decisiones sobre el efecto de las paradas automática en el proceso de inventario.	Optimización. Programación entera mixta.
Zhou y Peng (2017)	DL5	Caso práctico.	Investigar el problema de las entregas JIT en la logística interna.	Optimización. Programación matemática.
Peng y Zhou (2018)	DL5	Caso teórico.	Investigar el problema de programar varios servidores para las entregas JIT a línea.	Optimización. Programación lineal entera mixta.
Agnetis et al. (1997)	DL4; DL5	Caso práctico.	Reconocer áreas a mejorar de cara al aumento de la producción.	Simulación.
Emde y Boysen (2012b)	DL4; DL5	Caso teórico.	Minimizar costes de inventario y de remolcado.	Optimización. Programación dinámica.
Faccio, Gamberi, y Persona (2013)	DL3; DL4	Caso práctico.	Minimizar los costes totales.	Optimización.
Alnahhal y Noche (2013)	DL3; DL4; DL5	Caso teórico.	Minimizar el número de carretillas, la variabilidad de carga, la longitud de las rutas y los costes de inventario.	Optimización. Programación entera mixta y la Programación dinámica.
Satoglu y Sahin (2013)	DL3; DL4; DL5	Caso práctico.	Minimizar los costes de manipulación.	Optimización. Modelo matemático con un enfoque heurístico.
Fathi, Rodriguez, y Alvarez (2014)	DL3; DL5	Caso práctico.	Minimizar el número de viajes y/o inventario junto a la línea.	Optimización. Programación lineal entera mixta.
Dong, Zhang, Xiao, y Li (2015)	DL3; DL4; DL5	Caso práctico.	Maximizar el tiempo de intervalo entre envíos y la utilización media de los elementos de manutención.	Optimización. Heurística.
Alnahhal y Noche (2015b)	DL3; DL4; DL5	Caso teórico.	Minimizar el tiempo total de suministro.	Métodos analíticos y Optimización. Programación entera.

Autor	Clasificación	Propuesta	Objetivo	Método
Dong, Zhang, y Xiao (2016)	DL4; DL5	Caso teórico.	Minimizar los costes de suministro.	Optimización. Programación entera y programación dinámica.
Fathi, Rodriguez, Fontes, y Alvarez (2016)	DL3; DL4; DL5	Caso teórico.	Minimizar la cantidad de rutas y los costes asociados.	Optimización. Programación lineal entera mixta y algoritmo por enjambre de partículas.

Fuente: Elaboración propia.

3.10 Presentación junto a la línea (LP)

La presentación en línea de los componentes consiste en la manera en qué se exponen los contenedores de piezas al operario de la línea. Esta debe ser eficiente para asegurar que son fáciles de identificar y accesibles. Además de esto, se debe considerar el tipo de pieza y contenedor en el que se ubica, ya que podrá requerir una ubicación en el suelo (LP1) o bien se habrá de diseñar una estantería en el caso de piezas pequeñas en gavetas (LP2). El principal objetivo es aprovechar el espacio disponible para esta actividad mientras se minimizan las actividades sin valor añadido, como puede ser el movimiento del operario en vacío. También se debe tener en cuenta la disposición ergonómica de las piezas para el operario de la línea.

Hasta donde se conoce, este proceso no ha sido muy investigado en la literatura desde el punto de vista de suministro de material.

Graham (1992) comparan dos estrategias de control de inventario junto a líneas de montaje de automóviles, *kanban* y *triggers*. La primera controla la cantidad de material en los contenedores junto a la línea y la segunda estima los componentes necesarios en función de qué vehículo pasa en cada momento por un punto de control de la línea de montaje (LP1). Para ello los autores utilizan cadenas de Markov.

Finnsgård et al. (2011) analizan cómo la presentación de los materiales junto a las estaciones de montaje influye en el rendimiento de la línea de montaje, tanto en tareas sin valor añadido, requerimientos de espacio y operaciones ergonómicas, y las implicaciones de relacionarlas. Sus resultados muestran que utilizar contenedores más pequeños permite mejorar el rendimiento en las estaciones y su análisis permite ir más allá en la categorización de las operaciones del manejo de materiales (LP2).

Por otro lado, existe una literatura específica centrada en la ergonomía durante las actividades de manipulación de producto de manera manual en el entorno del automóvil y que, durante la revisión, ha aparecido, pero no se ha considerado por estar fuera del foco de esta tesis².

Tabla 12. Resumen de los trabajos sobre la presentación en línea. Fuente: Elaboración propia.

Autor	Clasificación	Propuesta	Objetivo	Método
Graham (1992)	LP1	Caso práctico.	Minimizar el nivel de inventario.	Modelo analítico. Modelo de Markov.
Finnsgård et al. (2011)	LP2	Caso práctico.	Desarrollar un modelo para describir el impacto del material expuesto en la estación de la línea en su rendimiento.	Cualitativo y analítico.

Fuente: Elaboración propia.

3.11 Discusión de los resultados de la revisión

A lo largo de este apartado se ha realizado una revisión sistemática de la literatura sobre la logística con el objetivo de comprobar qué problemas se han tratado y cómo sobre el suministro interno a líneas de montaje.

Las 88 publicaciones vistas se publicaron entre 1992 y 2019 (ver Figura 6). Hasta 2007, se aprecia como el tema del suministro era poco tratado en la literatura, y la mayoría de los trabajos se preocupaban de reducir el inventario junto a la línea. Del año 2008 en adelante, el suministro a líneas de montaje comienza a tomar mayor interés en la literatura. Durante este tiempo, los autores se centran en la gran variedad de productos y la falta de espacio junto a la línea. Esto conlleva nuevos problemas de decisión para los fabricantes, como es decidir el modo de suministro que mejor se ajuste a cada referencia y la gestión de este. El principal objetivo, que supone un reto para las líneas de montaje con mezcla de modelos actuales, es garantizar entregas de piezas eficientes y en el momento adecuados (Emde y Gendreau, 2017).

² Andriolo, Battini, Persona, y Sgarbossa (2016); Sylla, Bonnet, Colledani, y Fraisse (2014); Wagner, Kirschweng, y Reed (2009).

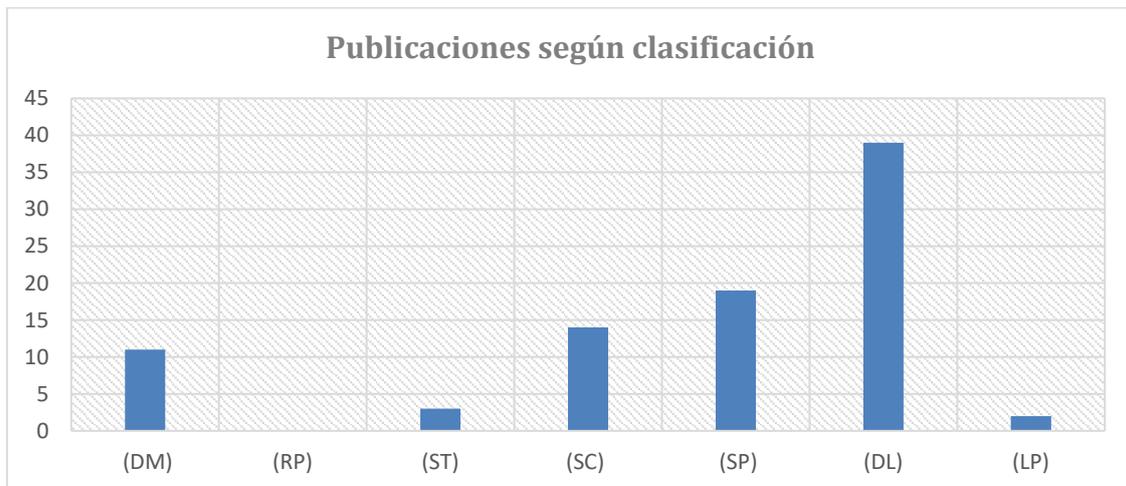
Figura 6. Número de publicaciones por año.



Fuente: Elaboración propia.

La afirmación anterior se aprecia en la gráfica de la Figura 7, la cual muestra la cantidad de documentos revisados sobre cada una de las etapas de la clasificación. Las más relevantes son la selección de la política de suministro con que se van a enviar los productos a la línea (22%) y los diferentes problemas que surgen durante la preparación de los envíos (44%), como las rutas, la carga de material, etc. Una correcta política de suministro y gestión de las entregas permite optimizar los costes de manipulación y de transporte del material. Lo que justifica que este sea el principal foco de los trabajos revisados.

Figura 7. Número de publicaciones según la etapa de suministro o nivel de diseño.



Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 13 muestra la tabla presentada en el apartado al inicio del capítulo, pero esta vez con los resultados obtenidos. Debajo de cada etapa se encuentran los documentos recogidos en cada etapa, sin embargo, dentro de cada subclasificación se pueden encontrar documentos que han tratado más de uno de los subproblemas descritos.

En la etapa de diseño macro los artículos sobre el diseño de suministro son más populares, esto se puede deber a que los problemas de diseño de instalaciones han sido muy populares en la literatura y reciben designaciones propias como puede ser el FLP (*Facility Layout Problem*).

La recepción de material en el automóvil sigue siendo un problema poco tratado pese a las grandes preguntas de investigación que plantea, como es la decisión de localización de los muelles, la programación de las ventanas horarias y la estimación de las flotas entre otros.

Los problemas de decisión en los almacenes suelen estar más focalizados en lo que ocurre en el interior y se desvincula del resto de etapas, como es el problema de ACW (*Assignment of Components in Warehouses*) o LAP (*Location Allocation Problem*) entre otros. Además, dentro de la industria del automóvil, debido a la elevada rotación del producto, el escaso inventario en las fábricas por trabajar con técnicas como JIT o JIS o que los diseños de las fábricas y las ubicaciones de las instalaciones suelen estar predefinidas desde sus orígenes, pueden ser algunos de los motivos por la escasa literatura sobre esta etapa.

En cuanto a la actividad de secuenciado, empieza a tener mayor notoriedad en la literatura. Actualmente con la elevada variedad de componentes las fábricas de automóviles deben contar con este tipo de células o áreas. Los problemas más tratados son la eficiencia del diseño de la célula en la definición del trabajo de los operarios, aunque también se han encontrado varios trabajos sobre dónde es mejor ubicar este tipo de áreas para ser más eficiente en el transporte a línea.

Un aspecto sobre el automóvil al que no se le había dado relevancia en la última revisión sobre este tema era la decisión de las políticas de suministro. Debido a la falta de espacio junto a la línea, la elevada variedad de componentes y el tener que trabajar siguiendo la secuencia de flujo de automóviles, se vuelve vital la toma de decisiones sobre qué política seleccionar según el tipo de producto y cómo implantarlas en plantas de montaje reales.

En cuanto a los envíos en línea, los problemas más tratados son la carga de material, las rutas de reparto y la programación de las salidas. Los costes de transporte y

manipulación de las piezas suponen una de las mayores partidas de coste de las plantas de montaje actuales.

Tabla 13 Número de publicaciones según la clasificación del suministro propuesta.

Diseño macro (DM)	Recepción de material (RP)	Almacenamiento (ST)	Secuenciado (SC)	Políticas de suministro (SP)	Envíos de material (DL)	Presentación en línea (LP)
11 artículos	0 artículos	3 artículos	14 artículos	19 artículos	39 artículos	2 artículos
Diseño de <i>layout</i> (DM1)	Entregas en secuencia (RP1)*	Almacén central (ST1)*	Las piezas se mueven hacia el operario (SC1)*	Selección de la política (SP1)	Asignación (DL1)*	Palés colocados en el suelo (LP1)
3 artículos	0 artículos	0 artículos	1 artículos	10 artículos	3 artículos	1 artículos
Diseño del suministro (DM2)	Entregas en camiones (RP2)*	Almacén descentralizado (ST2)*	El operario se mueve a buscar las piezas (SC2)*	Implementación de políticas (SP2)	Secuenciación (DL2)*	Pequeños contenedores en estantería (LP2)
8 artículos	0 artículos	0 artículos	8 artículos	9 artículos	2 artículos	1 artículos
		Localización de almacenes (ST3)	Localización de almacenes (SC3)		Carga (DL3)*	
		2 artículos	4 artículos		14 artículos	
		Asignación de piezas (ST4)	Asignación de piezas (SC4)		Rutas (DL4)*	
		1 artículos	1 artículos		18 artículos	
					Programación (DL5)*	
					21 artículos	

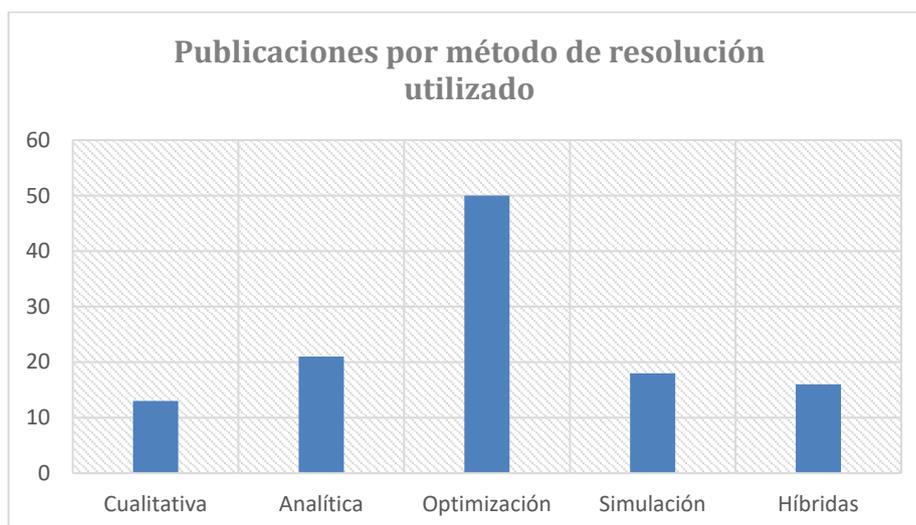
Fuente: Elaboración propia.

La presentación en línea, hasta donde llega nuestro conocimiento y la búsqueda realizada, es un tema poco tratado. Los principales resultados que fueron descartados estaban focalizados en la ergonomía del puesto de trabajo.

Por otra parte, la Figura 8 muestra las principales herramientas utilizadas en las publicaciones. Debido a la diversidad entre todas ellas, se han agrupado según sean cualitativos, modelos analíticos, de optimización, simulación o híbridas, es decir, combinan más de una herramienta en el trabajo. En la Tabla 7, Tabla 8, Tabla 9, Tabla 10, Tabla 11 y Tabla 12 se recoge más información.

La herramienta más utilizada es la optimización en sus diferentes campos, (programación lineal, programación dinámica, etc.), lo cual es comprensible siendo que el objetivo de la mayoría de los autores es optimizar las diferentes actividades que envuelven al suministro de piezas. En los siguientes puestos, se encuentran los métodos analíticos, que incluyen modelos probabilísticos o estimaciones numéricas, y la simulación. Los trabajos que utilizan la simulación lo hacen al considerar la topología de los pasillos durante el suministro, y los posibles factores que provocan paradas o retrasos en el suministro, como puede ser la congestión. También se han visto algunos trabajos cualitativos, en los que destacan revisiones literarias, aplicación de herramientas lean como el VSM, o marcos teóricos. Las llamadas herramientas híbridas, que mezclan más de una de las herramientas identificadas en el mismo trabajo, se encuentran en última posición.

Figura 8. Número de publicaciones que utilizan cada tipo de herramienta para enfrentar el problema.



Fuente: Elaboración propia.

La eficiencia es uno de los principales propósitos de los trabajos de investigación vistos. Entre ellos destaca el objetivo de mejorar el proceso de suministro para simplificar y reducir actividades innecesarias o de poco valor añadido, como reducir la cantidad cargas o entregas, u optimizar las rutas de reparto entre otros muchos (ver Tabla 7, Tabla 8, Tabla 9, Tabla 10, Tabla 11 y Tabla 12). El objetivo principal es minimizar la cantidad de tiempo invertido en operaciones logísticas y de transporte, lo que tiene un efecto sobre la cantidad de recursos y de medios necesarios para desempeñar un mismo trabajo. Dada la relevancia en la industria real y en la literatura, la eficiencia en sus diferentes vertientes es un objetivo clave a considerar durante el (re)diseño de sistemas de aprovisionamiento a líneas de montaje.

La Tabla 14 recoge todas las revistas que han publicado alguno de los documentos revisados en este capítulo. De las 36 revistas que han publicado algunos de estos artículos, 6 de ellas recogen casi el 60% de las publicaciones, siendo el resto revistas con una publicación o un par de casos dos. Principalmente, las revistas más interesadas en este tema del suministro en planta en el sector del automóvil han sido *International Journal of Production Research* y *Assembly Automation*. En la Tabla 15 se puede ver cada una de esas publicaciones por revista en qué etapa del suministro se categorizan.

Tabla 14. Número de publicaciones por revista.

Revista de publicación	Referencias	%
International Journal of Production Research	15	17,2%
Assembly Automation	10	11,5%
European Journal of Operational Research	8	9,2%
International Journal of Advanced Manufacturing Technology	8	9,2%
Computer and Industrial Engineering	5	5,7%
International Journal of Production Economics	5	5,7%
Flexible Services and Manufacturing Journal	2	2,3%
Industrial Management y Data Systems	2	2,3%
Robotics and Computer-Integrated Manufacturing	2	2,3%
Transportation science	2	2,3%
Cogent Engineering	1	1,1%
Computers and Operations Research	1	1,1%
Computers in Industry	1	1,1%
Engineering Optimization	1	1,1%
IIE Transactions	1	1,1%
Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)	1	1,1%
Infor	1	1,1%

Revista de publicación	Referencias	%
International Journal of Computer Integrated Manufacturing	1	1,1%
International Journal of Industrial Ergonomics	1	1,1%
International Journal of Modeling Simulation and Scientific Computing	1	1,1%
International Journal of Productivity and Quality Management	1	1,1%
International Transactions in Operational Research	1	1,1%
Journal of Manufacturing Science and Engineering-Transactions of the Asme	1	1,1%
Journal of Simulation	1	1,1%
Journal of the Operational Research Society	1	1,1%
Naval Research Logistics	1	1,1%
OR Spectrum	1	1,1%
Production Engineering-Research and Development	1	1,1%
Production planning & control	1	1,1%
Production Planning y Control: The Management of Operations	1	1,1%
Progress in Manufacturing automation Technology and Application	1	1,1%
Sadhana	1	1,1%
Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences	1	1,1%
Springer Plus	1	1,1%
Strojarstvo	1	1,1%
Tehnicki Vjesnik	1	1,1%
Tsinghua science and technology	1	1,1%
WPOM-Working Papers on Operations Management	1	1,1%
TOTAL	87	100%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 15. Número de artículos correspondientes a cada una de las etapas de la clasificación propuesta para cada una de las revistas.

Revista de publicación	DM	RP	ST	SC	SP	DL	Total
Assembly Automation	2		2	4	2		10
Cogent Engineering				1			1
Computer y Industrial Engineering			2	1	2		5
Computers and Operations Research					1		1
Computers in Industry			1				1
Engineering Optimization			1				1
European Journal of Operational Research			1	1	6		8
Flexible Services and Manufacturing Journal					2		2
IIE Transactions					1		1
Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)		1					1

Modelos y métodos para el análisis, diseño y evaluación de la logística interna de aprovisionamiento a líneas de montaje con mezcla de modelos en fabricación de automóviles

Revista de publicación	DM	RP	ST	SC	SP	DL	Total
Industrial Management y Data Systems				2			2
Infor	1						1
International Journal of Advanced Manufacturing Technology		2	1	1	4		8
International Journal of Computer Integrated Manufacturing					1		1
International Journal of Industrial Ergonomics					1		1
International Journal of Modelins Simulation and Scientific compluting					1		1
International Journal of Production Economics			1	2	2		5
International Journal of Production Research	3		2	5	3	2	15
International Journal of Productivity and Quality Management			1				1
International Transactions in Operational Research				1			1
Journal of Manufacturing and Engineering-Transactions of the Asme					1		1
Journal of Simulation					1		1
Journal of the Operational Research Society					1		1
Naval Research Logistics			1				1
OR Spectrum			1				1
Production Engineering-Research and Development					1		1
Production Planning y Control					1		1
Production Planning y Control: The Management of Operations	1						1
Progress In Manufacturing Automation Technology and Application	1						1
Robotics and Computer-Integrated Manufacturing Sadhana	1			1	1		2
Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences					1		1
Springer Plus					1		1
Strojarstvo					1		1
Tehnicki Vjesnik	1						1
Transportation Sciente					2		2
Tsinghua science and technology					1		1
WPOM-Working Papers on Operations Management	1						1
Total	11	3	14	19	39	2	87

Fuente: Elaboración propia.

Uno de los objetivos de esta revisión era ver cómo enfrenta la literatura el problema de la gestión del elevado volumen de movimientos en los pasillos junto a las líneas y los problemas de seguridad asociados. Lo que se ha visto es que una pequeña cantidad de los trabajos revisados se interesan en este tema en particular. Los principales motivos se pueden deber a que se trata de plantas monomodelo en las que la cantidad de variantes y la producción no generan tráfico de medios de manutención como tal, y no suponen un riesgo para el correcto funcionamiento de las instalaciones. Es por ello que el interés recae en reducir los costes logísticos.

Sin embargo, tal y como se ha presentado en el Capítulo 2 sobre la realidad industrial, el tráfico y seguridad del suministro a líneas de montaje de automóviles ha resultado ser una preocupación real de los gerentes de las fábricas. Además de ello, algunos autores como Hukan (2001) mencionan que las plantas de ensamblaje necesitan métodos para manejar y comprender cómo el aumento del tráfico afectará a la seguridad y las operaciones en general.

Durante la revisión literaria se han encontrado algunos autores a los que sí que se han preocupado de este problema en sus trabajos, pero no ha supuesto el principal objetivo del trabajo.

Emde, Fliedner, y Boysen (2012) durante su investigación, tratan el llenado de las carretillas para realizar entregas a línea, ya que, en algunos momentos del día, la capacidad de los trenes no es suficiente. Sin embargo, la posibilidad de añadir recursos adicionales en esos picos de trabajo lo consideran indeseable por incrementar el tráfico en planta.

Emde y Boysen (2012) apoyaron que dado un diseño de *layout* y un suministro a línea, hay otros factores que se tendrían que considerar, como la capacidad de los pasillos, posibles obstáculos y el riesgo de congestión entre otros.

Alnahhal y Noche (2013) investigan los problemas de programación y carga de material considerando la cantidad de inventario disponible junto a las estaciones. Minimizando las cargas, el número de ciclos y la desviación del *stock* de seguridad garantizan reducir los costes de mantenimiento y el tráfico de los trenes remolcadores.

Wang, Guan, Shao, y Ullah (2014) tratan simultáneamente los medios de manutención guiados y automáticos. A los autores les preocupa que ambos coincidan a la vez en un mismo pasillo, de manera que tratan de detectar si el pasillo está ocupado antes de entrar, con el fin de evitar accidentes entre las carretillas.

Alnahhal y Noche (2015) propusieron el uso de diferentes rutas de trenes *milk-run* para el suministro de un mismo pasillo en lugar de que una misma ruta se encargue de un pasillo completo. Este método es más flexible e incrementa el uso de los trenes, sin embargo, les preocupaba el hecho de que pudiera generar tráfico y atascos si más de un vehículo coinciden en un pasillo estrecho.

Boywitz et al. (2016) destaca en su trabajo sobre secuenciación de los asientos a entregar a línea, que pequeñas modificaciones pueden conllevar un tráfico considerable en el área de trabajo, por lo que es interesante realizar una optimización adicional al proceso de resecuenciado para ayudar a reducirlo.

Dong, Zhang, y Xiao (2016) en su trabajo intentan evitar la congestión provocada por las carretillas remolcadoras durante rutas de reparto JIT a línea.

Emde (2017) investigan la reposición de un área de supermercado de una fábrica de automóviles y se preocupan de minimizar los costes de todo el proceso y de mantener el tráfico por las instalaciones manejable al reducir la cantidad de movimientos durante las entregas.

Emde y Gendreau (2017) destacan que realizar paradas más cortas durante el suministro puede resultar beneficioso para reducir la congestión de los pasillos.

Otros autores en cambio, sí que tratan el tema del tráfico como uno de los objetivos principales y no como un factor más.

Alizon et al. (2009) buscan evitar que un diseño del sistema de manejo de materiales no funcional pudiera provocar falta de material en la línea o paradas de esta. Durante el diseño buscan bucles de entregas cortos, evitando pasillos sobrecargados y reduciendo las fuentes de congestión como retrasos en las intersecciones, paradas, averías de los vehículos entre otros.

Staab, Klenk, Galka, y Guenther (2016) se preocupan del tráfico de medios de manutención durante el aprovisionamiento a la línea de montaje. Utilizan medibles de los medios de manutención tanto de eficiencia (capacidad utilizada, nivel de servicio etc.) como de detección de puntos críticos que suponen un riesgo para el suministro (número de adelantamientos y número de elementos esperando entre otros). Estos puntos críticos se corresponden con aquellos que, dadas las circunstancias, (ej. un pasillo bloqueado, intersecciones, múltiples giros...) pueden retrasar el tiempo de suministro, suponiendo un riesgo para el suministro a línea, colas o paradas de producción o colisiones.

Asegurar un flujo de material eficiente y sin problemas asociados al tráfico es un hecho que preocupa tanto a investigadores como a los gerentes de las fábricas. La congestión debida al tráfico en los pasillos puede repercutir en problemas de suministro, eficiencia y seguridad tanto para vehículos como trabajadores (Tompkins, White, Bozer, y Tanchoco., 2003). Es por ello que durante el diseño del sistema de suministro se debe asegurar un movimiento seguro y eficiente de los elementos de mantenimiento (Shi, Liu, Shang, y Cui, 2013). Además, se debe garantizar la seguridad en el entorno de trabajo, como puede ser una correcta iluminación o el estado del pavimento, ya que en caso contrario, pueden ocasionar grandes pérdidas económicas y de personal para la empresa por posibles accidentes (Moatari-Kazerouni, Chinniah, y Agard, 2015).

Sin embargo, en los trabajos revisados se observa una carencia de investigaciones que traten en profundidad el problema de un elevado volumen de elementos de mantenimiento generados por los sistemas de suministro junto a la línea de montaje y los problemas de eficiencia y seguridad asociados. En el próximo capítulo, se plantea la necesidad de trabajar esta línea de investigación y por ello buscar literatura específica sobre ambas temáticas. De este modo se espera recabar información y directrices sobre cómo considerar estos aspectos para evaluar los diseños del suministro, que, en general, se han diseñado por los departamentos de ingeniería, y sobre los cuales se desea asegurar su eficiencia y seguridad tras su implementación.

3.12 Conclusión

En este capítulo se ha realizado una revisión sistemática de la literatura sobre el problema de suministro a líneas de montaje. Para ello se ha presentado la metodología de búsqueda utilizada, palabras clave, bases de datos, criterios de inclusión y exclusión. De una búsqueda inicial de en la que se descargaron 702 referencias, después de aplicar todos los criterios se seleccionaron 88 artículos completos.

De los trabajos seleccionados se ha presentado una taxonomía a seguir para organizar los artículos. Esta clasificación tiene como base la propuesta por Boysen et al. (2015) y ha sido ampliada, ya que el foco de su trabajo difiere en ciertos aspectos del de esta tesis. Esta taxonomía presenta diferentes etapas dentro del suministro en planta y dentro de cada una de ellas, los principales problemas de decisión que pueden surgir.

A continuación, se ha dedicado un apartado de este capítulo a cada una de estas etapas, donde se presenta una breve introducción sobre qué operaciones se llevan a cabo y los artículos recogidos en esta etapa y clasificados según el problema de decisión que traten.

Algunas de las etapas han sido poco trabajadas, como puede ser la recepción de material o almacenamiento, y otras en cambio cuentan con una gran aportación de trabajos, como es la decisión de las políticas de suministro y los envíos a línea, que recogen el 24% y 44% de los trabajos revisados respectivamente.

Los aspectos revisados para cada uno de los documentos han sido el objetivo que perseguían, qué método de resolución han utilizado (cualitativos, analíticos, optimización, simulación o híbridos), si se trataba de un caso teórico o práctico y la revista en la que fueron publicados. Para cada una de las etapas del suministro se ha elaborado una tabla resumen que recoge la información anteriormente citada.

Sin embargo, entre los trabajos vistos, no se ha visto ninguno que trate el problema del exceso de movimiento de los elementos de manutención junto a la línea, el cual era uno de los motivos de esta revisión. La mayoría de los trabajos tenían como objetivo la eficiencia del suministro, ya que los costes de manipulación suponen uno de los costes de producción más atacables.

De este modo, en el próximo capítulo se espera poder dar respuesta al problema del tráfico y seguridad en planta asociados al movimiento de los elementos de manutención, y para ello, se revisará literatura específica sobre el tema y se propondrá cómo evaluar sistemas de suministro a líneas de montaje, y qué herramientas serán las más apropiadas en cada momento.

4 REVISIÓN DE LA LITERATURA SOBRE EL TRÁFICO Y SEGURIDAD EN PLANTA

4.1 Introducción

En el capítulo anterior se ha analizado la literatura referente a la logística interna en el sector automovil, donde únicamente algunos trabajos identificaban el tráfico y la seguridad como un problema durante el suministro de material, y, además, muy pocos lo tratan como su objeto central de investigación. De este modo, en este capítulo se va a realizar una revisión de la literatura específica sobre los problemas de tráfico y seguridad en plantas de montaje asociados al movimiento de elementos de mantenimiento móviles.

El objetivo de este capítulo es definir si existe una preocupación real acerca del movimiento de estos elementos, y como el tráfico puede afectar a la eficiencia y seguridad del suministro. Se espera poder utilizar este capítulo como punto de partida para elaborar una propuesta para evaluar la seguridad en el movimiento de material de los sistemas de aprovisionamiento.

Para ello, se comprobará literatura específica sobre el tráfico de los elementos de mantenimiento en planta. Se espera identificar la principal preocupación de los investigadores y cómo enfrentan el problema del tráfico en cuanto a las herramientas de resolución y medibles. A continuación, se revisará la literatura sobre la seguridad asociada a los elementos de mantenimiento en entornos de producción, de donde se espera obtener qué preocupa a los investigadores y cómo enfrentan el problema.

También se revisará la literatura existente sobre la simulación por eventos discretos y los diversos enfoques de modelado que surgen en la literatura para simplificar la construcción de modelos de simulación de los sistemas de suministro y manejo de materiales. Finalmente, se incluirá un apartado con aquellos trabajos que han combinado la simulación con herramientas de optimización en enfoques híbridos para poder abarcar una mayor cantidad de problemas de decisión, tanto macro, como micro.

El resto del capítulo se estructura como sigue. Primero se revisará la literatura sobre el tráfico y, a continuación, sobre la seguridad en planta. Después, se revisa literatura sobre la simulación por eventos discretos y los distintos enfoques de simulación de entornos de suministro. Para recopilar, se discuten los resultados de

la revisión para identificar las necesidades de evaluación a considerar en futuros capítulos. Finalmente se presentan las conclusiones del capítulo.

4.2 Metodología de búsqueda

Este capítulo recoge tres apartados de revisión de literatura. El primero de ellos trata sobre el tráfico en planta asociado a los elementos de manutención. El segundo sobre los problemas de seguridad en planta generados por el movimiento de elementos de manutención en las inmediaciones de la zona de trabajo. El tercer apartado corresponde con el uso de los enfoques de las herramientas de simulación por eventos discretos y su combinación con la optimización.

El tema del tráfico se ha revisado utilizando una estrategia de búsqueda de bola de nieve. Tal y como se ha visto en el capítulo anterior, el tráfico en planta no es un tema popular en la literatura sobre la logística interna como objeto principal de investigación. Sin embargo, sí que se identifica como un problema real existente en las plantas de montaje actuales. No se ha encontrado mucha literatura con un objetivo específico de tratar el tráfico asociado a los elementos de manutención en planta.

Para revisar la literatura, se han recopilado los artículos destacables del capítulo anterior que sí tratan este tema como uno de los objetivos principales en su investigación, y se han utilizado como punto de partida para encontrar aquellos documentos que han citado estos trabajos posteriormente.

En cuanto a la búsqueda de trabajos sobre la seguridad en planta de los elementos de manutención, se ha realizado una revisión sistemática. El objetivo era encontrar aquellos artículos cuyo objetivo era el problema de la seguridad/riesgo asociado a los elementos de manutención en entornos de producción o ensamblaje. Los criterios de inclusión para estos trabajos fueron:

- Que el resumen del trabajo respondiera al objetivo de investigación.
- Artículos en revistas científicas y actas en congresos.
- En todos los casos, documentos sometidos a un proceso de revisión por pares.
- En castellano o inglés.
- Con fecha de publicación entre 2007 hasta junio 2017.
- Indexados en Web of Science o Scopus.

De esta revisión finalmente se encontraron 23 trabajos que respondían al objetivo y cumplían los criterios de inclusión. Durante la revisión gran parte de los trabajos encontrados correspondían con temas de ergonomía, los cuales se descartaron por no ser el foco de esta tesis.

También se incluye una revisión de artículos sobre herramientas disponibles para cuantificar el tráfico, en concreto, la simulación por eventos discretos. Esta permite considerar la dinámica y complejidad de los sistemas de aprovisionamiento a líneas de montaje al utilizar enfoques de simulación que permiten, entre otras cosas, separar el flujo de información del de materiales durante la simulación.

Además de esto, tal y como se ha visto en el capítulo anterior, la mayoría de los problemas de decisión asociados al suministro se han resuelto mediante herramientas de optimización, o también como una combinación de ambas, simulación y optimización. Es por ello que, para considerar tanto los problemas de decisión de diseño durante el suministro como la cuantificación del tráfico, se puede recurrir al uso combinado de ambas herramientas, y, por lo tanto, se recopilan algunos trabajos relacionados.

4.3 Revisión de la literatura sobre la congestión y el tráfico en planta

En este apartado se revisa la literatura en la que el objetivo principal de la investigación es el tráfico generado en plantas de producción debido al movimiento de material mediante elementos móviles de mantenimiento. Entre ellos destacan algunos trabajos que pretenden mejorar la congestión del tráfico durante el diseño de *layout*.

Benjaafar (2002) presenta un modelo de diseño de *layout* cuyo objetivo es reducir la congestión, la cual relaciona con la cantidad de WIP (*work in process*) acumulado, tanto en el sistema de manejo de materiales como en los diferentes departamentos. En sus resultados muestra que, un diseño de *layout* obtenido con una formulación convencional QAP (*Quadratic Assignment Problem*) reduce las distancias totales, pero incrementa el WIP, y por tanto la congestión. El autor destaca que el diseño de *layout* tiene un gran impacto en el rendimiento de las operaciones, y que, considerar el fenómeno de la congestión en las primeras etapas del diseño, supone una ventaja.

Chiang, Kouvelis, y Urban (2002) modelaron el problema de diseño de *layout* (FLP) con interferencias del flujo como un problema QAP. En su trabajo identifican dos factores a considerar a la hora de determinar la cantidad y el coste del tráfico dentro de las instalaciones. El primero de ellos es la cantidad de flujo entre instalaciones y

el segundo factor es la cantidad de interferencias entre los elementos de manutención. Entienden como interferencia la existencia de intersecciones en las instalaciones.

Chiang, Kouvelis, y Urban (2006) trataron el tema del efecto del flujo de trabajo durante el diseño de *layout* (FLP). Para ello presentan un modelo de programación lineal y no lineal entera con el que consideran dos objetivos, las interferencias entre instalaciones y la distancia mínima. En su trabajo destacan el gran impacto que tiene el tráfico entre instalaciones y la poca relevancia que se le ha dado en la literatura. También recalcan el efecto de este flujo de trabajo en sistemas automatizados con AGV como elementos de manutención y la relevancia de considerarlo durante el diseño.

Zhang, Batta, y Nagi (2011) afirman que, cuando se da situación de congestión con frecuencia, minimizar los tiempos totales de movimiento de material es mejor que minimizar las distancias en un diseño de *layout*. Además de ello, si cambiar la ruta del flujo de material no es suficiente, es interesante ir un paso más allá e implementar cambios en el *layout* que alivien la congestión, que además de eso, proporciona una mayor flexibilidad al sistema. En su trabajo proponen un modelo basado en el problema QAP que, optimiza el *layout* y las rutas. Además de ello, presentan un modelo de simulación para verificar los beneficios de incorporar el factor de la congestión en el diseño de *layout* y de rutas, lo que supone un sistema de manejo de materiales más eficiente.

Kim, Yu, y Jang (2016) investigan el diseño de *layout* siguiendo la estrategia de minimizar la distancia entre instalaciones para reducir las distancias totales recorridas por los elementos de manutención, la cual es muy utilizada en la industria. Sin embargo, este tipo de asignación tiene un efecto sobre la congestión del flujo o el exceso del tráfico del sistema de manejo de materiales. Para ello utilizan la simulación para analizar el método de diseño tradicional e identifican sus limitaciones y beneficios en un caso real.

En general, se puede concluir que reducir las distancias entre instalaciones recorta los tiempos totales, pero implica un exceso de carretilleros en una pequeña sección de espacio. Esto ocurre durante el suministro de material a líneas de montaje o estaciones de trabajos. Se trata de un transporte de material fijo y con una alta periodicidad, lo que puede generar tramos del trayecto congestionados.

Hugan (2001) trata el incremento de entrega de piezas que experimenta la industria del automóvil, ya que cada vez se entregan lotes más pequeños y con mayor

frecuencia. Es por ello que sugieren que las plantas de montaje necesitan métodos para manejar y entender cómo el incremento del tráfico afecta a la seguridad y a las operaciones de las instalaciones. En su trabajo se centra en el uso de simulación DES para enfrentar el problema del tráfico. Su modelo considera múltiples factores como la programación de la planta, el tamaño de la flota, el tiempo de transporte o la velocidad de los elementos de manutención entre otros. El autor reduce la congestión del tráfico redirigiendo las rutas de transporte de aquellos componentes que no resultan críticos por intersecciones menos saturadas pese a aumentar la longitud de la ruta y, por tanto, el tiempo de transporte.

Zhang, Batta, y Nagi (2009) tratan el concepto de flujo de congestión asociado a las interrupciones de los elementos de manutención en instalaciones de producción o almacenamiento. Los autores, después de un periodo de observación en una fábrica, destacan 4 tipos de interrupciones que causan la congestión del flujo de los elementos de manutención. Las (1) intersecciones, donde los elementos de manutención tienen que parar la circulación para evitar accidentes con otros elementos o con peatones; (2) el hecho de que dos o más vehículos tratan de acceder a un mismo pasillo estrecho, donde un vehículo tiene que retroceder o retirarse hacia un lado para permitir que el otro pase; (3) los conductores tienen que bajar la velocidad o incluso llegar a detenerse para permitir un paso seguro de los peatones; (4) las operaciones de carga/descarga de los elementos de manutención en algunas localizaciones obligan a otros a tener que parar y esperar a su finalización. Uno de los principales hallazgos de su trabajo es que, cambiando la ruta del tráfico en una instalación congestionada, se consigue aliviar los retrasos y se minimizan los tiempos de transporte. Es decir, seguir la ruta del camino más corto interesa utilizarlo en situaciones de bajo tráfico, en cambio, en condiciones de tráfico moderado-alto esta modalidad causa más congestión. Para llevar a cabo todo esto combinan un modelo probabilístico, un algoritmo de optimización y un modelo de simulación.

Gamberi et al. (2009) reflejan la importancia que tiene en las industrias de producción actuales cuantificar y optimizar los costes del flujo de materiales. Para ello proponen un modelo que analiza y controla las operaciones de los elementos de manutención en plantas de producción de manera cuantitativa. Esta herramienta les ayuda a determinar las necesidades de espacio de los departamentos, los requerimientos del sistema de transporte, el rendimiento, y el tiempo dedicado por el flujo de material a recorrer las instalaciones y en los atascos de los medios de manutención. Para ello integran la programación lineal junto con un algoritmo de

dispatching y una simulación visual. El objetivo es ofrecer a los gerentes de la planta, de una manera rápida y automática, un modelo con información relevante sobre el flujo de material que genera el *layout*. La simulación visual tiene un gran valor en esto al colorear automáticamente el flujo de material para identificar fácilmente qué pasillos tienen un tráfico respecto de otro.

Zhang, Batta, y Nagi (2010) centran su trabajo en la congestión del flujo de trabajo debida al tráfico de medios de manutención en instalaciones de producción. Proponen un modelo de simulación en la cual la velocidad del transporte varía debido a interrupciones de los vehículos, carga y descarga, intersecciones del flujo, tránsito de peatones y el efecto de la aceleración/deceleración durante la conducción. Los resultados indican que los modelos de simulación que consideran el efecto de la congestión son capaces de estimar de manera más aproximada los tiempos consumidos por los elementos de manutención que aquellos que no los consideran. Esto supone un beneficio en el ahorro en los costes de manipulación debido a conocer la congestión.

Staab, Röschinger, Dewitz, y Günthner (2015) presentan un caso real de suministro a una línea de montaje de automóviles con mezcla de modelos en la que analizaron la eficiencia del suministro de material mediante carretillas remolcadoras. En su trabajo intentan dar respuesta a varias preguntas, como por ejemplo si el sistema era capaz de asegurar el suministro, mantener el nivel de servicio deseado, la cantidad de recursos necesarios, y el volumen del tráfico y problemas de seguridad asociado a los elementos de manutención. Para ello proponen el uso de un modelo de simulación DES con el que analizan aspectos como el movimiento de material, las rutas, los retrasos, prioridad de paso en intersecciones o la posibilidad de adelantamientos entre las carretillas remolcadoras según las características de los pasillos (anchura, doble sentido...) entre otros.

Los principales medibles con los que evalúan el tráfico y seguridad del suministro es (1) el número de vehículos por hora que atraviesan una sección y (2) el tiempo de espera por cada hora de los medios de manutención y sección, debidos a los factores del tráfico, como coincidir elementos en un pasillo o la existencia de obstáculos. Para visualizar y analizar simultáneamente los medibles, colorean algunas secciones con el tráfico que experimentan. Después de analizar los resultados, los autores afirman que es necesario considerar la congestión en la planificación de futuras rutas de entrega y suministro, ya que el volumen de tráfico puede ser crítico para la seguridad en el entorno de trabajo, como, por ejemplo, operarios que tienen que cruzar este tipo de puntos de interés.

Staab, Klenk, Galka, y Günthner (2016) se preocupan por el tráfico generado durante el suministro de material, ya que puede generar paradas de la producción, colas durante las entregas o incluso accidentes. Para lidiar con este problema, proponen un modelo de simulación sobre el suministro mediante *milk-runs* a una línea de montaje del sector del automóvil. Durante el diseño consideran los procesos de carga, entregas y adelantamientos de los medios de manutención, así como la variación de la demanda para considerar la situación del tráfico actual, el nivel de servicio y la estabilidad del sistema de suministro. Proponen diferentes medibles como la cantidad de adelantamientos realizados con éxito para asegurar el suministro. Detectan puntos conflictivos de tráfico, los cuales tratan de esquivar antes de tomar decisiones durante el transporte.

Çelik y Süral (2016) consideran que el tiempo de transporte asociado con las tareas de *picking* depende no solo de la distancia recorrida sino también del efecto de los giros durante la actividad. Además, la existencia de flujos mixtos de peatones y vehículos en pasillos estrechos y con una elevada actividad repercute negativamente en la seguridad. En su trabajo tratan de optimizar las rutas al minimizar el tiempo de viaje y consideran los giros entre pasillos como una penalización del modelo con la finalidad de minimizarlos, ya que reducen la visibilidad y tienen un efecto negativo en la seguridad del suministro. En los resultados muestran que esto no solo consigue mejorar la eficiencia sino también reducir la probabilidad de riesgos asociados a este tipo de actividad, como atropellos o colisiones.

Luo, Guan, Wang, Yue, y Peng (2017) investigaron la descarga de plataformas de material para entregarlas a una línea de montaje de automóviles. Una de las principales preocupaciones de los autores es la congestión que genera el que los elementos de manutención tengan que realizar esperas debido a picos de trabajo en la planta. Estos picos generan un gran volumen de medios de manutención en cola con largos tiempos de espera para cargar material en los almacenes para enviarlo a la línea. Para lidiar con esto proponen el uso de una herramienta de simulación por eventos discretos con la que, a partir de un análisis de la situación actual y los resultados de nuevas alternativas, proponen mejoras en la estrategia de distribución, la implantación de diferentes políticas de entrega en lugar de una común a todas las piezas, así como la programación de las entregas. Al mejorar los modos de suministro, consiguen un menor volumen de medios de manutención simultáneos y también reducir los tiempos de espera en el almacén. También se reduce la congestión existente en el diseño inicial.

En la Tabla 16 se han resumido los trabajos anteriormente analizados. La tabla refleja qué problemas han detectado los autores en torno a los elementos de mantenimiento y el tráfico en planta, cómo estiman el tráfico, qué herramienta utilizan y el entorno de aplicación.

Tabla 16 Comparativa de trabajos sobre el tráfico en planta.

Autores	Problema asociado al tráfico de elementos de mantenimiento	Estimación del tráfico	Herramienta	Aplicación
Hugan (2001)	Se preocupan por el incremento de entregas de piezas que está experimentando la industria del automóvil. En concreto, la cantidad de tráfico y la seguridad de las operaciones de los elementos de mantenimiento en la fábrica.	Cantidad de veces que se atraviesa cada sección. Tiempo requerido para cada componente desde que llega la petición hasta que se entrega en el punto de consumo.	Simulación DES	Industria del automóvil
Benjaafar (2002)	Congestión del <i>work-in-process</i> (WIP) del Sistema de manejo de materiales. Buscan reducir los tiempos de lead time y minimizar el inventario WIP.	Cantidad de WIP. Inversión del manejo de materiales. Costes de congestión.	Optimización y Simulación	Fabricación
W.-C. Chiang, Kouvelis, y Urban, (2002)	Necesidad de reducir las interferencias del flujo de trabajo durante el diseño de <i>layout</i> en lugar de minimizar solo los costes de transporte.	Cantidad de flujo entre instalaciones.	Optimización	Fabricación

Autores	Problema asociado al tráfico de elementos de mantenimiento	Estimación del tráfico	Herramienta	Aplicación
Chiang, Kouvelis, y Urban (2006)	El tráfico entre las instalaciones de producción es un hecho al que se le ha dado poca relevancia en la literatura durante el diseño de <i>layout</i> .	Cantidad de flujo entre instalaciones. Cantidad de interferencias entre cada pareja de instalaciones.	Optimización.	Fabricación.
Zhang, Batta, y Nagi (2009)	Interrupción del flujo de trabajo de los elementos de mantenimiento en entornos de producción.	Tiempo total de transporte. Interrupciones que ocasionan congestión.	Modelo probabilístico, optimización y simulación.	Fabricación y Almacenes.
Gamberi et al. (2009)	Importancia de optimizar y cuantificar los costes del flujo de materiales en la industria de producción actuales.	<i>Traffic index</i> (TI), cantidad de veces que un pasillo ha estado ocupado en comparación con el resto de pasillos.	Optimización y simulación.	Industria del automóvil.
M. Zhang, Batta, y Nagi (2010)	Necesidad de prestar atención a la congestión del flujo de trabajo debida al tráfico de los elementos de mantenimiento en producción.	Tiempo total requerido durante el transporte, considerando aceleración, deceleración e interrupciones.	Simulación.	Fabricación.
Min Zhang, Batta, y Nagi (2011)	Relevancia de la congestión de los elementos de mantenimiento generada en instalaciones de fabricación.	Cantidad de flujo de medios de manutención a través de una conexión.	Optimización y Simulación.	Fabricación.

Autores	Problema asociado al tráfico de elementos de manutención	Estimación del tráfico	Herramienta	Aplicación
Staab, Röschinger, Dewitz, y Günthner (2015)	Mantener seguridad y nivel de servicio en las rutas de entrega de material. Congestión y tráfico en intersecciones y pasillos.	Número de vehículos que atraviesan una sección por hora Tiempo de espera por cada hora y sección.	Simulación DES.	Líneas de montaje de automóviles con mezcla de modelos.
Staab, Klenk, Galka, y Günthner (2016).	Se preocupan por el tráfico generado durante el suministro de material, ya que puede generar paradas de la producción, colas durante las entregas o accidentes. Evitar posibles retrasos y falta de materiales por el tráfico.	Una carretilla revisa si un tramo se considera conflictivo por ya albergar varios elementos de manutención. En caso afirmativo trata de evitarlo o realizar un adelantamiento.	Simulación.	Logística de una planta de producción del automóvil.
Çelik y Süral (2016)	Efecto de realizar giros durante actividades de <i>picking</i> , ya que la reducción de velocidad conlleva que disminuya la eficiencia del sistema y que aumente la congestión y accidentes.	Estiman la cantidad de giros efectuados en cada entrega.	Optimización.	Producción y almacenes.

Autores	Problema asociado al tráfico de elementos de manutención	Estimación del tráfico	Herramienta	Aplicación
Kim, Yu, y Jang (2016)	Se preocupan por la congestión y el tráfico del sistema de manejo de materiales. Estudian el efecto en la congestión de elementos de manutención, de los diseños de <i>layout</i> basados en la distancia mínima entre instalaciones.	Volumen de tráfico entre instalaciones.	Simulación DES.	Industria de semiconductores.
Luo, Guan, Wang, Yue, y Peng (2017)	Les preocupa la eficiencia del sistema de suministro actual a línea de montaje. Para ello estudian la congestión generada en el almacén por la cantidad de medios de manutención esperando a poder cargar/descargar.	Número de entregas de material. Volumen de elementos de manutención por hora. Longitud de la cola para cada plataforma. Tiempos de espera.	Simulación DES.	Líneas de montaje de automóviles.

Fuente: Elaboración propia.

Tal y como se había sugerido en anteriores capítulos, el tráfico en planta se planteaba como un problema en plantas de montaje multimodelo. La literatura vista refleja que este problema se da en entornos de montaje y fabricación con elevado flujo de elementos de manutención. Un tercio de los artículos revisados son publicaciones en congresos, lo que refleja que es un tema novedoso y poco usual en los objetivos de las revistas de operaciones.

En estos trabajos también se ha visto la preocupación de los autores por el efecto del tráfico en la eficiencia del suministro y la necesidad de asegurar el suministro de material a tiempo y sin retrasos, pero también se asocia con un problema de seguridad. Además del movimiento de material, existe la posibilidad de que aumente la probabilidad de trabajar en un entorno de poca seguridad si el entorno de trabajo no acompaña a la situación del tráfico, como es la distribución en planta,

la topología de los pasillos, la visibilidad de los pasillos, iluminación, etc. (Saez-Mas, Garcia-Sabater, Garcia-Sabater, et al., 2018).

Los autores tienden a cuantificar el flujo de material entre instalaciones para estimar el tráfico y tratar de reducir el volumen total mientras intentan ser más eficientes. El objetivo es minimizar el tráfico para que no interfiera en el movimiento de material. El principal medible es la cantidad de movimientos por unidad de tiempo.

Al considerar la estocasticidad, entra en juego la simulación, y es por ello que el 75% de los trabajos revisados la utilizan como herramienta de evaluación, aunque también se utilizan algunos enfoques híbridos de optimización junto con simulación cuando se tienen otros objetivos además del análisis del flujo de material.

4.4 Revisión de la literatura sobre la seguridad en entornos de producción

En este apartado se revisa la literatura existente sobre cómo afecta a la seguridad el movimiento de los elementos de mantenimiento en entornos de producción y montaje. La mayoría de los artículos encontrados tratan temas de ergonomía de los operarios durante las actividades logísticas y actividades logísticas externas, los cuales no son foco de esta tesis. Sin embargo, un número reducido de artículos sí que han destacado el problema de la seguridad que conllevan los elementos de mantenimiento en producción como una realidad a considerar. Estos trabajos se han agrupado según el tipo de objetivo seguido.

4.4.1 Mejorar la disposición del entorno de trabajo

Algunos de los trabajos revisados proponen mejoras en la disposición del entorno para mejorar la seguridad durante el suministro.

Basa et al. (2011) destacan el peligro de las maniobras, la dirección y la aceleración de las carretillas elevadoras, y el peligro que supone para los operarios que circulan andando alrededor. Para enfrentarlo proponen un modelo para simular la circulación de las carretillas elevadoras y tratar que la conducción sea más segura en temas de conducción, aceleración y frenado, maniobras etc.

Swietlik (2013) destaca la cantidad de problemas de seguridad que todavía se dan durante las actividades logísticas en los muelles de carga y descarga. En su trabajo identifican diferentes tipos de riesgos, según si la actividad se realiza dentro o fuera de los muelles, y principalmente se relaciona con el uso de carretillas elevadoras. Sin embargo, aunque se intenta avanzar en el uso de otro tipo de tecnologías para estas actividades, es difícil que en los próximos años se dejen de utilizar este tipo de

carretillas. De manera que en las empresas se debe seguir invirtiendo en mejorar las buenas prácticas en el entorno de trabajo de los elementos de manutención para garantizar la seguridad y prevenir los accidentes.

Sáez-Más et al. (2016) se preocupan por la seguridad durante el rediseño del sistema de suministro de una planta de montaje del subconjunto motor y transmisión del sector del automóvil. Proponen el uso de la simulación por eventos discretos para representar el nuevo sistema de suministro para evaluar la disposición de las instalaciones con el objetivo de simplificar el flujo de material y reducir la cantidad de movimientos en pasillos sobrecargados.

4.4.2 Mejorar el estado de los elementos de manutención

Otros autores, en lugar de tratar de mejorar el proceso de trabajo del entorno de trabajo, centran su interés en el estado de los elementos de manutención como medida de prevención de seguridad.

Rinchi, Pugi, Bartolini, y Gozzi (2010) enfocan su trabajo en las estadísticas de accidentes en torno a las carretillas elevadoras, las cuales tienen un elevado grado de peligrosidad, y cómo los procedimientos de seguridad no son suficientes para reducir los accidentes. Los autores desarrollan un sistema para controlar la estabilidad de los vehículos industriales con el que evalúan las condiciones de carga y previenen condiciones de trabajo inestables.

Martinez-Barbera et al. (2010) diseñan y desarrollan un sistema de AGVs dotado de inteligencia artificial para satisfacer las necesidades de los sistemas de manejo de materiales en la industria. Durante el proceso consideran distintos aspectos, entre los que se encuentra la seguridad, la flexibilidad, la robustez y la simplicidad. El AGV es capaz de esquivar obstáculos y mantener una distancia de seguridad cuando se aproxima a otros objetos.

Goomas y Yeow (2013) tratan de mejorar la seguridad durante la conducción de elementos de manutención en centros de distribución. Para ello cada uno de los vehículos se revisa antes de su conducción para garantizar el buen estado de este. Los autores comparan dos formatos de comprobación del estado en un mismo centro de trabajo, uno en papel y otro digitalizado.

Jegen-Perrin, Lux, Wild, y Marsot (2016) se interesan por el problema de las colisiones entre los diferentes elementos de manutención y peatones en plantas. Para ello investigan el uso de cámaras en las partes traseras de los vehículos con el objetivo de mejorar la visibilidad de las personas que cruzan entre los conductores.

En su trabajo evalúan diferentes tipos de cámaras y pantallas para comprobar el efecto en la reducción del riesgo.

Ferreira, Gorchach (2016) desarrollan un sistema de manejo de materiales en una planta del sector del automóvil en la que se ha decidido utilizar AGVs para mejorar la eficiencia de las operaciones y evitar tareas peligrosas para la salud de los trabajadores. Durante el diseño se consideran algunos factores como la ergonomía, eficiencia y seguridad mediante un FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis*). Para mejorar la seguridad durante el suministro incluyen en el parachoques un detector de movimiento con el que evitar posibles colisiones.

4.4.3 Mejorar el nivel formativo de los trabajadores

Otro conjunto de autores asocia la baja seguridad de los elementos de manutención con una falta de conocimiento y nivel formativo de los trabajadores. Para ello proponen refuerzos en su formación para una conducción segura.

Yuen, Choi, y Yang (2010) trabajan los accidentes de carretillas elevadoras en almacenes y buscan mejorar la seguridad y mentalidad de conducción de los conductores. Para ello generan un prototipo con el que simular las operaciones de carretillas elevadoras con una interfaz intuitiva. Con ella tratan de conseguir un entorno de realidad virtual y capacitar e involucrar a los conductores en accidentes virtuales. El objetivo es mentalizar en la importancia de la seguridad a los conductores y que consigan habilidades para un mejor manejo en condiciones adversas. Como resultado de esta implementación, se espera que los accidentes de carretillas elevadoras puedan reducirse, beneficiando así a toda la industria logística y las cadenas de suministro.

Kumar, Sakthivel, Elangovan, y Arularasu (2015) se preocupan por las tasas de accidentes de trabajadores en entornos poco seguros. Aunque se haya trabajado durante años en elaborar medidas de seguridad en planta, las cuales se monitorizan para asegurar su cumplimiento, los índices de accidentes siguen siendo elevados. Esto se debe a que los trabajadores desconocen los peligros o las normas de seguridad. El objetivo de su trabajo es desarrollar una interfaz de la base de conocimiento para la gestión de seguridad y salud de los trabajadores. Los autores se preocupan por dos bloques de posibles amenazas. El primero de ellos responde a temas de estándares de trabajo seguridad e higiene, equipamiento de protección, identificación de riesgos y reacción de los trabajadores frente a la seguridad. El segundo bloque se interesa por los sistemas de gestión técnica, como la seguridad

y mantenimiento de todos los elementos de manutención y de movimiento de material, así como de prevención y protección.

4.4.4 Mejorar el estado del entorno de trabajo

Finalmente, una gran parte de los trabajos encontrados proponen la consideración de factores cualitativos del entorno de trabajo que interfieren en el nivel de seguridad durante la circulación de los elementos de manutención, y las cuales deberían tenerse en cuenta durante el diseño de instalaciones o de sistemas de suministro o de manejo de materiales.

Gauthier et al., (2007) se interesan por los accidentes de las carretillas elevadoras en muelles de carga y descarga. Para ello desarrollan una herramienta de evaluación de seguridad de acuerdo a las medidas de restricción de los camiones en los muelles de carga. La herramienta presentada permite evaluar el nivel de seguridad y sugerir las características necesarias que debe tener un sistema para ser completamente efectivo en el contexto dado. Esta herramienta está diseñada para ayudar a las empresas a elegir las medidas de seguridad óptimas a implementar.

Aneziris, Papazoglou, y Doudakmani (2010) se preocupan de la seguridad laboral, es por ello que aplican el modelo de análisis del riesgo ocupacional WORM en una planta de aluminio. En ella evalúan diferentes puestos de trabajo donde hay posibilidad de riesgos de accidentes o daños permanentes. En su trabajo identifican las 63 amenazas descritas en WORM, de las cuales 5 se asocian al uso de elementos de manutención en el trabajo. Los autores destacan la importancia de cuantificar el riesgo ya que permite la incorporación de medidas para reducirlo.

Horberry (2011) defiende que un diseño de un entorno eficiente y seguro, y centrado en la gestión del tráfico en sistemas donde trabajan elementos de manutención, trabajadores y otros vehículos es un elemento clave en casi cualquier industria. Aunque las fábricas tienen normas y directrices que a menudo no se utilizan ni aplican de manera estricta. También destaca que sería interesante contar con ayuda adicional para la gestión del tráfico, ya que en algunas industrias los procedimientos respecto a la gestión del tráfico de los elementos de manutención son limitados o apenas se han definido. Es por ello que el autor propone adaptar e implementar varios de los principios de la gestión del tráfico en carretera a las plantas de producción a través de 50 preguntas clave para ayudar y asegurar la seguridad de los elementos de manutención. Estas preguntas se centran en el efecto en la seguridad del entorno de trabajo (pasillos, velocidad, iluminación, accesos, señales de tráfico etc.), tareas realizadas (mantenimiento de los vehículos,

conducción etc.) y el personal involucrado (formación, protección, comunicaciones de seguridad e higiene entre otros).

Afrooz Moatari-Kazerouni, Chinniah, Agard, Moatari-Kazerouni, Afrooz Chinniah, y Agard (2015) se preocupan de incorporar medidas de seguridad e higiene durante la primera etapa del diseño de *layout*, ya que para las organizaciones puede suponer grandes ahorros económicos y de mano de obra como resultado de evitar accidentes industriales. Es por ello que esta investigación explora qué factores cualitativos de la seguridad e higiene en el trabajo se deben incluir en los modelos de diseño de *layout* como elementos esenciales durante el diseño.

Sáez Más, García Sabater, Saez Mas, y Garcia-Sabater (2016) proponen un protocolo de gestión de riesgos y análisis del flujo de material durante el suministro a una línea de montaje de automóviles. En este protocolo sugieren utilizar la simulación por eventos discretos para cuantificar el flujo de material. También proponen un cuestionario con el que evaluar diversos factores de riesgo, los cuales tratan de reducir a través de cambios en el *layout*. El objetivo es conseguir un diseño de aprovisionamiento más seguro. Entre los diferentes factores de interés resaltan aquellos asociados a la topología de los pasillos (cruces, doble sentido, giros...), el entorno de trabajo (iluminación, ruido, pavimento...), los tipos de elementos de mantenimiento (autoguiados, carretillas elevadoras, flujos mixtos...) o la actividad realizada en los pasillos entre otros (transporte, carga/descarga...).

4.4.5 Discusión de los resultados

De estos trabajos, se puede extraer que los elementos de mantenimiento suponen una preocupación tanto en entornos de producción reales así como para los investigadores. Las carretillas elevadoras son las que más tragedias causan, de hecho, se sabe que uno de los medibles de seguridad en planta de uno de los principales fabricantes de automóviles es la cantidad de metros libres de este tipo de carretillas (*forklift free area*). Este medible se ha trabajado en diversas investigaciones como las de Bauters et al., (2015), Cottyn et al. (2008) y Govaert (2011). El resto de elementos de mantenimiento también repercuten en la seguridad, como por ejemplo por su longitud, ya que al ocupar más espacio, interfieren en el paso de otros elementos, cruces, y visibilidad de conducción.

En la Tabla 17 se han resumido los trabajos citados y de los cuales se identifica la principal preocupación de los elementos de mantenimiento, qué impacto tiene en las operaciones de la planta de producción, cómo se ha enfrentado el problema y en qué ámbito se ha aplicado.

Tabla 17 Resumen de los trabajos sobre seguridad en planta asociada al movimiento de elementos de mantenimiento.

Artículo	Preocupación en cuanto al manejo de medios de mantenimiento	Consecuencias para las operaciones en planta	Propuesta	Industria de aplicación
Horberry (2011).	El tráfico de los medios de mantenimiento y peatones es algo vital a considerar en todas las industrias. Encontrar el equilibrio entre la seguridad y la productividad en entornos industriales.	Colisiones y sus consecuencias, por muertes y pérdidas económicas por reparaciones y pérdidas en producción.	Cuestionario cualitativo.	Producción, minería, aeropuertos.
Afrooz Moatari-Kazerouni, Chinniah, Agard, Moatari-Kazerouni, Afrooz Chinniah, y Agard (2015).	Uno de los principales objetivos durante el diseño de layout es minimizar el transporte de los elementos de mantenimiento, sin embargo, hay otros muchos factores que deben considerarse como la seguridad e higiene en el trabajo, el flujo de materiales y de información, los costes de reorganización o la congestión del tráfico.	No considerar la seguridad e higiene durante el diseño de layout, puede incurrir en pérdidas económicas causadas por accidentes y a la baja eficiencia de las operaciones.	Incorporan factores de seguridad e higiene en el trabajo a los modelos de diseño de layout (FLP).	Producción.
Swietlik (2013).	Pese a la mejora de los procedimientos de seguridad en entornos industrial, las actividades logísticas de carga y descarga mediante carretillas siguen causando accidentes graves año tras año.	Afecta a la productividad.	Identifican diversas causas que suponen un riesgo para el entorno de trabajo y proponen medidas para enfrentarlas.	Producción y logística.

Artículo	Preocupación en cuanto al manejo de medios de manutención	Consecuencias para las operaciones en planta	Propuesta	Industria de aplicación
Anil Kumar, Sakthivel, Elangovan, y Arularasu (2015).	Los elevados índices de accidentes en entornos de trabajos y asociados al uso de maquinaria y elementos de manutención suponen un problema a considerar. También reflejan que los trabajadores desconocen los peligros o las normas de seguridad no se están siguiendo de manera estricta.	No definido.	Proponen un programa de formación en seguridad en el trabajo.	Construcción.
Aneziris, Papazoglou, y Doudakmani (2010).	Seguridad e higiene en el trabajo.	El trabajo se centra en las repercusiones para los trabajadores.	Cuantifican el riesgo para proponer e incorporar medidas para reducir el riesgo.	Producción.
Sáez-Más et al. (2016).	Seguridad del diseño de suministro debido al flujo de material.	Paradas del suministro por accidentes o tráfico.	Modelo de simulación para evaluar el diseño de suministro y la localización de instalaciones.	Producción de automóviles.
Sáez Más, García Sabater, Saez Mas, y Garcia-Sabater (2016).	Seguridad del diseño de suministro debido al flujo de material.	Paradas del suministro por accidentes o tráfico.	Cuestionario de gestión de riesgos para evaluar el movimiento de los elementos de manutención en entornos de producción.	Producción de automóviles.

Artículo	Preocupación en cuanto al manejo de medios de mantenimiento	Consecuencias para las operaciones en planta	Propuesta	Industria de aplicación
Gauthier et al., (2007)	Accidentes de carretillas elevadoras en muelles de carga/descarga.	No definido.	Realiza una herramienta para definir la seguridad de los muelles.	Producción de componentes electrónicos.

Fuente: Elaboración propia.

4.5 Revisión de la literatura sobre herramientas de simulación para la evaluación cuantitativa de la eficiencia y el tráfico en planta

4.5.1 Enfoques de simulación por eventos discretos

Con el paradigma de la personalización en masa de los productos, las compañías necesitan poder dar una respuesta rápida en sus fábricas ante las nuevas necesidades de los consumidores (Mourtzis, Doukas, y Bernidaki, 2014). Esto supone un desafío para industrias complejas como es la del automóvil, donde es difícil y caro adaptar las plantas de producción a los requisitos de la demanda, mientras que sus operaciones continúan siendo eficientes (Tjahjono y Fernández, 2008).

La gestión del flujo de materiales a través de carros y otros elementos móviles no es un aspecto que suele ser considerado durante el diseño de *layout*. No solo es difícil debido a su naturaleza dinámica, sino que también se considera de poca relevancia en los entornos de fabricación de líneas de montaje clásicas, donde se muestra más interés en la capacidad de la máquina que en los movimientos anteriores y posteriores de los vehículos futuros y de sus componentes.

Sin embargo, la variedad de interacción de la información y el transporte de material en los sistemas de fabricación actuales (Li, Yao, y Zhou, 2016), que involucra hasta cinco modelos de automóviles en la misma línea de montaje de automóviles, dificultan el análisis de este flujo. Para ese propósito, vale la pena el desarrollo de un diseño utilizando modelos de simulación durante el proceso de toma de decisiones de reconfiguraciones de sistemas de fabricación (Centobelli et al., 2016). La simulación por eventos discretos permite considerar la dinámica de los sistemas de fabricación.

Además, la complejidad de estos sistemas requiere la coexistencia de datos con un alto nivel de incertidumbre y un conjunto de posibles escenarios que deben combinarse con múltiples alternativas de diseño.

Por otra parte, las simulaciones de los sistemas de suministro requieren de un elevado tiempo de modelado que no siempre se dispone, por lo que investigadores han buscado otras formas de construir modelos de simulación con diferentes enfoques.

De este modo, a medida que aumenta la necesidad de evaluación, la variabilidad de los requisitos y la complejidad de los sistemas a modelar, se necesitan enfoques de simulación alternativos que reduzcan el tiempo necesario para el desarrollo de modelos (Mclean, Jones, Lee, y Riddick, 2002).

Este requisito favorece el uso de la llamada simulación *data-driven*, que Pidd (1992) definió como "un modelo genérico diseñado para aplicarse a una amplia gama de sistemas que tienen similitudes estructurales". Este tipo de simulación complementa aquellas circunstancias en las que se tienen que evaluar múltiples modelos similares (Tannock, Cao, Farr, y Byrne, 2007).

Clark y Cash (1993) sugieren que un modelo puede considerarse *data-driven* "cuando los usuarios pueden aplicar el modelo a diferentes situaciones cambiando la información que solo requiere conocimiento del dominio del problema con un requisito mínimo de conocimientos de modelado". También permite crear una gran variedad de escenarios para que puedan explorarse con relativa rapidez y sin tener que adquirir el nivel de experiencia de simulación que normalmente se requiere (Tannock et al., 2007).

Estos modelos también pueden parametrizarse completamente proporcionando datos a través de un conjunto de formularios, tablas, hojas de cálculo o plantillas (Mclean et al., 2002). Por lo tanto, no es necesario crear diferentes modelos de simulación, excepto si son lógicas especiales que no se consideran en partes comunes (Lim y Seo, 2014).

Muchos investigadores han aplicado este y otros enfoques de simulación con diferentes objetivos, como reducir los tiempos de modelado, conseguir un modelado automático, o integrar diferentes sistemas en el modelo de simulación, como, por ejemplo, el sistema de manejo de materiales o un gestor de almacenes.

Son y Wysk (2001) presentan una arquitectura para la generación automática de modelos de simulación. La información estática y dinámica en la simulación se

deriva de un modelo *shop-floor*. Lo aplican a seis sistemas de fabricación con procesos de material, diferentes elementos de manejo de material y un AS/RS.

Kim et al. (2009) sugieren un marco de modelado genérico de simulación *data-driven* y del *layout*. El marco consiste en un software de modelado de diseño llamado *AutoLay* y un software de simulación genérico llamado *AutoLogic*. Con este marco, se puede desarrollar un modelo de simulación integrado de los procesos de producción y del proceso de manejo de materiales en un corto período de tiempo.

Wy et al. (2011) introducen un marco genérico de modelado de simulación (*AutoLay* y *AutoLogic-Assembly*™) para reducir el tiempo de construcción del modelo de simulación, el cual se basa en la simulación *data-driven*. *AutoLay* convierte los datos de diseño en el formato de archivos CAD en modelos de simulación. *AutoLogic-Assembly* es un modelo de simulación genérico que se ha desarrollado para considerar líneas de montaje integradas con la logística generalizada.

Wang et al. (2011) presentan una metodología de simulación *data-driven* para modelar automáticamente un sistema de producción que se pueda modificar rápidamente una línea de montaje de automóviles. Las lógicas del sistema se subcontratan a través de la interfaz de programación de aplicaciones (API) del software de simulación. Esto confiere flexibilidad al modelo ante diferentes escenarios y datos de producción.

Lim y Seo (2014) proponen un modelo de simulación genérico que utilizan para reducir los tiempos de modelado y hacer que los modelos de simulación sean más confiables al emplear parámetros para ejecutar automáticamente modelos de simulación. El concepto de simulador genérico incluye extraer el almacenamiento de partes del dominio común, por ejemplo, programar lógicas o las reglas de operación del sistema de manejo de materiales en simulaciones de fabricación.

Estos trabajos plantean el problema de cómo modelar las lógicas de los sistemas de información sin separarlo del flujo de materiales según los enfoques de simulación *data-driven* o similares. Sin embargo, hoy en día es común encontrar trabajos de investigación que presentan el modelado de simulación como una combinación de módulos. Esto se debe a la complejidad real de los sistemas de fabricación, que implica la planificación y el control de las operaciones, el manejo de materiales y los sistemas de almacenamiento, entre otros.

Kehris (2009) ofrece un prototipo de simulador de sistemas de producción basado en web que consta de tres módulos: el módulo de simulación, el módulo de *groupware* y el módulo de gestión de proyectos y flujo de trabajo.

Debevec, Simic, y Herakovic (2014) proponen un enfoque innovador llamado PoVEIR, que crea una fábrica virtual combinando un sistema físico virtual y un sistema de información real. Presentan el método desarrollado y los modelos de simulación, lo que demuestra su aplicabilidad práctica en pequeñas empresas con un tipo de producción individual o en pequeñas cantidades.

Seebacher et al. (2015) presenta un enfoque para evaluar de manera práctica y viable la eficiencia de los procesos logísticos de producción. Con este objetivo, ofrecen un sistema que permita procesar la comunicación entre los productos, los vehículos de transporte interno y el sistema ERP.

Saez-Mas, Garcia-Sabater, y Morant-Llorca (2018) proponen un enfoque de simulación por eventos discretos en cuatro capas con el que diferencian la lógica de simulación, de los datos, de la parte visual y de la red de elementos. Con este enfoque pretenden simplificar la simulación de entornos de producción y de manejo de materiales complejos y facilitar la experimentación al realizar cambios sobre la capa deseada.

Como puede verse en la literatura, los investigadores utilizan distintos enfoques de simulación con diversos objetivos. Sin embargo, según el conocimiento de la autora, no se han encontrado otros trabajos de investigación que proporcionen un enfoque de modelado para lidiar con la complejidad de los sistemas de manejo de materiales en el sector del automóvil. Para llenar este hueco, se propone facilitar el modelado de simulación en los que interfieran elementos de mantenimiento móvil, separando el modelo de simulación en 4 capas (la red, la lógica, la base de datos y la visual). En el capítulo 12.1 de anexos, se presenta cada una de las capas en mayor detalle y se explica cómo se relacionan estas entre sí.

4.5.2 Enfoques híbridos de simulación y optimización

Según se había visto en el capítulo 3, en cuanto a logística en planta, Boysen et al. (2015) destacaron que, a pesar de la gran relevancia del proceso de suministro en la industria del automóvil y la gran cantidad de problemas de optimización, como la asignación, la reposición, las rutas y la programación entre otros, la mayoría de los problemas de decisión han sido cubiertos por pocos o ningún artículo científico. Además, los autores sugieren utilizar la simulación para hacer frente a las interdependencias de los problemas de optimización.

El desarrollo de herramientas de optimización nuevas y cada vez más robustas y su incorporación a los modelos de simulación amplían su aplicación en los sistemas de

fabricación (Negahban y Smith, 2014). Figueira y Almada-Lobo (2014) afirmaron que los enfoques híbridos de simulación-optimización brindan múltiples ventajas y se usan para resolver desafíos de relaciones no lineales, aspectos cualitativos o incluso procesos difícilmente modelados por expresiones analíticas, aunque suelen dar como resultado métodos exigentes en cuanto al esfuerzo computacional. En su trabajo, los autores propusieron una taxonomía en la que se identifican tres líneas principales del porqué combinar la simulación con la optimización, la evaluación de soluciones (SE), la mejora del modelo analítico (AME) y los enfoques de generación de soluciones (SG).

En la literatura también se refieren a SE como Optimización de simulación (SO), y el modelo de simulación se utiliza para representar y evaluar el rendimiento de varias soluciones para después encontrar una solución buena (u óptima) (Galluccio, 2017). Sin embargo, la evaluación de un gran número de soluciones puede ser computacionalmente compleja y la simulación de todos los resultados puede no ser relevante. El enfoque de SG simplifica ese proceso y propone que primero se optimice el modelo y luego se simulan las soluciones. Cuando los resultados de la simulación basada en la optimización muestran discrepancias importantes con respecto a la solución inicial o las suposiciones hechas durante el proceso de optimización, esta nueva información de los resultados se puede usar para mejorar el modelo analítico de manera cíclica, lo que se denomina enfoque de mejora del modelo analítico (Galluccio, 2017). Estos métodos híbridos se han utilizado anteriormente en sistemas de montaje, como el de Prajapat y Tiwari (2017).

Vonolfen, Kofler, Beham, Affenzeller, y Achleitner (2012) estudiaron los diferentes pasos involucrados en el suministro de la línea de montaje desde un centro de logística central, almacenamiento, recolección y transporte de materiales. Para ello utilizaron un enfoque de simulación y optimización. En el primer paso, se optimiza la asignación de almacenamiento para permitir un proceso de selección eficiente. La asignación del espacio de almacenamiento resultante se valida mediante un modelo de simulación del *picking* y del transporte, donde se simulan las interacciones dinámicas entre los recolectores individuales y el transporte interno de piezas entre el almacén y las estaciones de trabajo individuales.

Zhuo, Chua Kim Huat, y Wee (2012) desarrollaron un método híbrido que combinando con simulación DES para evaluar el rendimiento de un sistema de montaje bajo diferentes políticas de control y enumeración, las cuales están basados en un algoritmo de búsqueda para optimizar el espacio disponible. Sus resultados

mostraron que estos modelos híbridos podrían mejorar significativamente el rendimiento de un sistema dinámico de producción con limitaciones de espacio.

Faccio, Gamberi, Persona, Regattieri, y Sgarbossa (2013) propusieron un enfoque integrado tanto para el largo plazo (modelo analítico estático) como para el corto plazo (simulación dinámica) para diseñar un sistema de suministro a líneas de montaje de automóviles con mezcla de modelos. Gamberi, Manzini, y Regattieri (2009) presentaron un modelo integrado, basado en programación lineal, algoritmo *dispatching* y simulación visual. En su trabajo reflejan la relevancia de la optimización del flujo y la cuantificación de los costes del manejo de materiales que se destinan a la industria fabricación moderna.

Kanduc y Rodic (2016) presentó un método heurístico novedoso para la optimización del diseño, tratando de reducir los costes al minimizar la distancia total recorrida. Este método fue validado utilizando DES.

Zupan, Herakovic, y Starbek (2016) estudiaron el flujo de materiales en un taller de producción y propusieron un algoritmo heurístico que apuntaba a minimizar simultáneamente el tiempo promedio de flujo y los tiempos de espera de los pedidos, y maximizar la ocupación promedio de las estaciones de trabajo. El algoritmo abarcó varias reglas de prioridad, así como un algoritmo GA. Finalmente, se desarrolló un DES para simular y evaluar el flujo de materiales producido por los métodos antes mencionados.

Imran, Kang, Hae Lee, Zaib, y Aziz (2017) combinaron DES y GA para formar un enfoque que minimizara el WIP para problemas de diseño de células en la industria del automóvil.

Dehghanimohammadabadi y Keyser (2017) ilustraron cómo vincular SIMIO (software DES) con MATLAB, (software de computación numérica orientada a objetos), a través de la interfaz de programa de aplicaciones (API) de SIMIO. En su trabajo presentan un modelo de simulación basada en la optimización iterativa y proponen un caso de estudio para demostrar la flexibilidad de dicho esquema híbrido que utiliza tres algoritmos diferentes: GA, SA y optimización *Particle Swarm* (PSO).

Estos enfoques híbridos también se han utilizado para tratar algunas decisiones estratégicas, como la optimizar la disposición de instalaciones, como es en el caso del *Facility Layout Problem* (FLP).

Krishnan et al. (2009) presentaron un enfoque FLP basado en algoritmos genéticos (GA) que tratan de manejar el riesgo que supone la incertidumbre de la demanda del producto durante el diseño de instalaciones. Clasificaron el FLP en dos tipos, por un lado, un problema de diseño de instalaciones estático (SFLP) y otro problema de diseño de instalaciones dinámico (DFLP), asumiendo que en el último caso las demandas del producto varían de un período al siguiente.

Ku, Hu, y Wang (2011) propusieron la implementación de una simulación recocida (SA) y GA para abordar el FLP con áreas desiguales con una función multi-objetivo: el coste de MF, la relación de forma y los factores de utilización del área.

Ficko y Palcic (2013) diseñaron una herramienta para generar diseños de *layout* robustos para sistemas más grandes con el objetivo de ayudar a los procesos de toma de decisiones. Para ese propósito, utilizaron una heurística específica conocida como el método del triángulo modificado y GA para el FLP.

Hasda, Bhattacharjya, y Bennis (2016) presentaron un algoritmo basado en un método de optimización híbrido para resolver el problema FLP estático o dinámico con un tamaño desigual de departamentos.

Kulturel-Konak (2017) utilizó un enfoque matemático para diseñar instalaciones de logística y fabricación desiguales. Una búsqueda tabú (TS) determina la ubicación relativa de los departamentos, mientras que el modelo de programación matemática calcula su ubicación y forma exacta.

Se pueden encontrar más trabajos de investigación relacionados con FLP utilizando optimización matemática en el trabajo de Anjos y Vieira (2017).

Tal y como se ha visto, la integración de ambas herramientas proporciona múltiples ventajas, como considerar los aspectos dinámicos de los sistemas de producción, también amplía la funcionalidad de las herramientas de simulación, además de ser una vía de investigación prometedora (Dehghanimohammadabadi y Keyser, 2017).

En este trabajo, se propone utilizar ambas herramientas, según sean necesarias individualmente o conjuntamente, para apoyar el proceso de toma de decisiones de un diseño o evaluación de los sistemas de suministro.

4.6 Discusión de las necesidades para la evaluación del tráfico y seguridad de sistemas de suministro

La complejidad de los sistemas de suministro junto con la gran cantidad de movimientos de elementos de mantenimiento que se requieren junto a las líneas de

montaje para el suministro, puede suponer un problema para las plantas de fabricación de automóviles, especialmente para las multimodelo. Se ha visto que el suministro afecta tanto al tráfico como a la seguridad en los alrededores de las líneas, por lo que ambos aspectos se deberían considerar durante las fases de diseño y evaluación de dichos sistemas. Sin embargo, en la literatura ambos temas se suelen tratar de manera independiente.

En la literatura, el tráfico se relaciona con la existencia de congestión del flujo de material en una planta, el cual tiene un efecto directo sobre la eficiencia del sistema. La congestión puede generar accidentes, que el movimiento del material no sea fluido y, por lo tanto, requiera de mayor tiempo, o incluso que se puedan generar retrasos en el suministro.

En la literatura, el concepto de congestión parece ser el mismo para todos los autores, una situación provocada por el exceso de vehículos en un mismo pasillo o actividades logísticas asociadas a estos que impiden un flujo continuo de conducción por ocasionar un incremento del tiempo de transporte teórico esperado. Sin embargo, la manera de medir la congestión es diferente para cada uno de ellos (ver Tabla 18).

Tabla 18. Concepto de congestión del tráfico para diferentes autores.

Referencia	Medible de congestión
Hugan (2001)	Número de vehículos que cruzan a través de las intersecciones
Gamberi, Manzini y Regattieri (2009)	Elevado índice de tráfico, el cual se asocia con el número de veces que se ha cruzado un pasillo respecto a otros.
Zhang, Batta, y Nagi (2009)	Fenómeno que evita la circulación libre de los vehículos y los fuerza a reducir la velocidad o incluso detenerse.
Alizon et al. (2009)	Momento en que los vehículos se quedan bloqueados en un pasillo dado mientras cargan/descargan materiales junto a la línea.
Kortus, Daumler, y Schmidt (2018)	Existe congestión cuando el tiempo de transporte se prolonga por encima del estimado.
Kim, Yu, y Jang (2016)	Consecuencia de bloqueos, tráfico e interferencia de vehículos en mismo espacio.

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la seguridad, el suministro a líneas de montaje puede incurrir en dos aspectos. El primero se refiere al hecho de que conviven trabajadores y elementos de mantenimiento en una zona de pequeñas dimensiones y con un elevado volumen de actividad logística. El segundo se relaciona con los riesgos que conlleva para el

suministro. Una gran cantidad de movimientos y operaciones de vehículos en un área limitada puede originar congestión o cuellos de botella, y generar retrasos durante las entregas a línea. Por ambos motivos será necesario evaluar la actividad logística para conseguir un buen diseño que asegure la disponibilidad de los elementos de mantenimiento para realizar las entregas y que el flujo de material sea seguro y eficiente (Shi et al., 2013).

Por otra parte, en el capítulo 3 se ha visto que la eficiencia durante el suministro de material se ha trabajado en la literatura desde diferentes aspectos, como es evaluando y mejorando el diseño de los modos de suministro o políticas de suministro, la cantidad de recursos necesarios, la ubicación de instalaciones, la asignación de productos, las rutas de transporte o la definición de las etapas de suministro entre otros muchos. Con cada uno de estos cambios, los diferentes autores buscan reducir los esfuerzos logísticos, los sobrecostes y simplificar los problemas de suministro a línea.

Sin embargo, la eficiencia, no solo debe intentar minimizar únicamente recursos y costes, sino que se debe buscar ser eficiente considerando simultáneamente el posible tráfico generado en la planta. De este modo se busca evitar posibles situaciones poco seguras que además pongan en riesgo el suministro de material y su eficiencia, con colas o cuellos de botella.

Tal y como se ha visto el tráfico y la seguridad son de gran relevancia, pero hasta donde llega el conocimiento de la autora, no se han encontrado trabajos que los consideren simultáneamente como objetivos clave en el diseño y evaluación de los sistemas de aprovisionamiento.

4.7 Conclusión

A lo largo de este capítulo se ha revisado la literatura sobre el tráfico y seguridad en planta asociado al movimiento de elementos de mantenimiento.

En primer lugar, se ha revisado la literatura sobre la congestión y el tráfico en planta asociada a los elementos de mantenimiento móvil. Esta revisión se ha hecho siguiendo una metodología de búsqueda por bola de nieve. Los artículos destacables del capítulo 3 se han utilizado como punto de partida para encontrar otros similares. Como conclusión de ese apartado, se ha presentado una tabla en la que se recoge para cada uno de los artículos, qué problema identifican los autores en cuanto al tráfico, qué medible del tráfico proponen, qué herramienta utilizan y el entorno de aplicación del documento.

En segundo lugar, se ha realizado una revisión sistemática sobre aquellos trabajos que tratan la seguridad de los elementos de manutención y cómo afecta al suministro o al entorno de producción. En este caso, los artículos se han agrupado según traten problemas asociados a las características de los elementos de manutención, a la formación de los conductores, problemas durante el suministro, y también aquellos que proponen o identifican factores cualitativos que interfieren en la seguridad. De estos trabajos también se propone una tabla que recoge la principal preocupación de la seguridad de los elementos de manutención, las consecuencias de estos en las operaciones de la planta, la propuesta de los autores y la industria de aplicación.

A continuación, se ha revisado la literatura sobre la simulación por eventos discretos como herramienta para evaluar el flujo de material en entornos de producción en los que la dinámica y estocasticidad de los sistemas son relevantes. En la literatura se utilizan diversos enfoques de simulación para facilitar el modelado de la complejidad de estos sistemas. Además, este apartado también recoge trabajos que combinan el uso de la simulación con herramientas de optimización. La combinación de ambas permite enfrentar problemas de diseño o de carácter más estratégico con su validación posterior mediante simulación para conocer el tráfico asociado.

Finalmente, se ha discutido la información recogida a lo largo del capítulo e identificado el tráfico y la seguridad durante el suministro como factores necesarios a considerar durante el diseño y evaluación de estos sistemas.

5 METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE LA SEGURIDAD Y EL TRÁFICO DE LA LOGÍSTICA INTERNA

5.1 Introducción

En este capítulo se propone una metodología de evaluación de la seguridad y el tráfico en planta asociado a los elementos de mantenimiento durante el suministro en planta.

El principal objetivo es dar respuesta a una falta de métodos que consideren simultáneamente los aspectos del tráfico y la seguridad. Con esta metodología se espera poder obtener información relevante para evaluar sistemas ya existentes o incluso propuestas de diseño futuras.

Para ello se va a utilizar la información recogida en el capítulo anterior sobre la literatura que ha tratado previamente estos temas para proponer qué herramientas y medibles utilizar para cuantificar el tráfico y evaluar cualitativamente la seguridad del entorno de trabajo.

Además, cabe destacar que esta metodología es la versión final propuesta después de su aplicación iterativa en varios casos reales que se presentarán en los próximos capítulos y que, por lo tanto, se ha ido puliendo en las sucesivas iteraciones, a la luz de la experiencia y de la teoría. La metodología consta de 6 fases con varias tareas intermedias.

El resto del capítulo se estructura como sigue. En primer lugar, se presenta la propuesta de herramientas y medibles de evaluación del tráfico. A continuación, se presenta la herramienta de auditoria con todas las preguntas referentes a la seguridad de los elementos de mantenimiento. Por último, se presenta la metodología y se describe cada una de sus 5 fases. Finalmente, se finaliza el capítulo con las conclusiones.

5.2 Propuesta de herramientas y medibles de evaluación cuantitativa de la seguridad

Para cuantificar el flujo de material y poder evaluar su eficiencia, además de aquellas situaciones en las que el tráfico en planta es una realidad, la simulación y la optimización resultan herramientas apropiadas. La propuesta de este apartado surge de lo visto en la literatura de los capítulos anteriores, en la que la eficiencia en

el suministro a líneas de montaje se trataba principalmente mediante optimización y en algunos casos se hacía uso de la simulación como herramienta de validación.

La optimización proporciona grandes ventajas sobre la eficiencia, ya que un buen diseño y estimación de requerimientos se ve repercutido de forma positiva en el rendimiento económico de la empresa.

En cuanto a los trabajos vistos en capítulos anteriores que consideraban el tráfico en planta, la herramienta más utilizada ha sido la simulación ya que permite considerar la estocasticidad y dinámica que caracteriza a estos sistemas de suministro. Además, también posibilita considerar el aspecto visual, el cual resulta de gran valor añadido a la hora de presentar resultados a los gerentes de fábricas de montaje (Gamberi et al., 2009).

El concepto de congestión tal y como se ha visto en la literatura del capítulo anterior, se puede relacionar con la densidad del tráfico, la cual ha sido ampliamente estudiada en el campo de la ingeniería del tráfico (Gartner, Messer, y Rathi, 1992).

Para cuantificar el tráfico en planta en este trabajo se van a utilizar medibles extrapolados de la ingeniería del tráfico como la intensidad, el volumen diario o la congestión (ver Tabla 19), los cuales están definidos en el *Highway Capacity Manual* (HCM) de gestión de carreteras (Board, 2010).

Tabla 19. Propuesta de medibles a utilizar para cuantificar el tráfico en planta.

Medible	Unidad	Descripción
Intensidad	Vehículos / hora	Movimientos de elementos de manutención por pasillo, intersección y puntos de cruce durante un periodo de tiempo de 1 hora.
Volumen	Vehículos / día	Movimientos de elementos de manutención por pasillo, intersección y puntos de cruce durante un periodo de tiempo de 1 día.
Congestión	Vehículos / pasillo o acceso	Número de elementos de manutención que se encuentran durante un periodo de tiempo determinado en un pasillo o sección.

Fuente: Elaboración propia.

La intensidad estima la cantidad de vehículos que cruzan una sección o cruce durante una hora. En el caso del volumen, el lapso de tiempo es de un día. Estos medibles se consideran estáticos, se pueden estimar de manera analítica, y son la base para un diseño eficiente de *layout*. Para cuantificarlos, y localizar su

movimiento, sería suficiente conocer el punto de inicio y de fin de los movimientos de suministro de material en las plantas, siguiendo la menor distancia recorrida y conociendo la cantidad de entregas diarias necesarias.

Los diseños con una perspectiva estratégica utilizan medibles promedios de eficiencia considerando desviaciones. Cuando se habla del tráfico y seguridad, los valores promedio de intensidad y volumen proporcionan información relevante para poder identificar a priori puntos críticos que puedan suponer un problema en el futuro por falta de capacidad, y pueden servir para dimensionar accesos o pasillos. Sin embargo, la realidad es que lo importante es conocer los peores casos posibles, por lo que puede ser interesante conocer la intensidad horaria en cada momento de la producción, así como valores máximos y mínimos con ayuda de la simulación por eventos discretos.

En el caso de la congestión (ya sea el promedio o máxima) observada durante un momento dado en cada pasillo durante un día, aporta información detallada sobre cómo respondería el sistema de producción al nuevo diseño. Este medible ayuda a validar los diseños al aportar qué cantidad de elementos de manutención pueden llegar a coincidir en algún momento en una sección.

Estos valores son los que debieran interesar a los gerentes de la planta, porque les pueden prevenir de situaciones conflictivas y de estrés, como el hecho de que vayan a coincidir 15 carretillas simultáneamente en un pasillo (congestión máxima) o que un pasillo esté ocupado por 4 carretillas (congestión media). Aunque en valores promedio un diseño se puede considerar factible, estas situaciones son las que definen la verdadera robustez del sistema y garantizan un suministro sin riesgo de sufrir retrasos.

Esta información se considera de utilidad ya que puede permitir tomar decisiones como realizar cambios de *layout*, políticas de conducción o cambios en la topología de los pasillos para prevenir atascos y problemas de seguridad pese a que pueda suponer a priori un efecto negativo sobre la eficiencia.

La congestión media y máxima, al igual que la intensidad horaria, no pueden estimarse utilizando modelos estáticos, siendo necesario recurrir a enfoques dinámicos como la simulación por eventos discretos.

Por otra parte, dada la complejidad de modelado de los sistemas de suministro, se propone el uso de un enfoque de simulación en 4 capas. Este enfoque surge de la necesidad de separar el flujo de material (vehículos y camiones) del flujo de información. Con este propósito, en esta metodología se sugiere la concepción de

los modelos de simulación como una arquitectura de 4 capas (separar la capa de la red, la lógica, la base de datos y la parte visual). Al hacerlo, no solo se abstraen los datos del modelo para permitir el manejo de un mayor volumen de datos, sino que también se propone distinguir los procesos lógicos (aquellos que toman decisiones) de los procesos físicos (aquellos que agregan valor) en modelado.

Este enfoque busca descomponer el problema para lograr un mejor diseño, enfrentando de manera independiente cada capa y combinándolas entre sí. Esta forma de modelado es adecuada para problemas complejos como el de (re)diseño de *layout*, la gestión del flujo de material o el elevado volumen de datos a manejar, y favorece la detección de problemas que de otra manera podrían haberse pasado por alto. También permite un crecimiento modular del modelo de simulación, lo que favorece realizar cambios en las capas sin alterar todo el modelo de simulación, además de reutilizar las capas en futuros modelos de simulación.

El concepto de 4 capas es relevante en este contexto, ya que distingue la recopilación y el almacenamiento de la información de cada dominio y también separa los principales módulos del modelo. En la arquitectura propuesta, se utilizan cuatro bloques para construir el modelo. La idea de las capas fue sugerida por Saez-Mas, Garcia-Sabater, Morant-Llorca, y Maheut, (2016) y finalmente presentada en Saez-Mas, Garcia-Sabater, y Morant-Llorca, (2018). Las cuatro capas propuestas son:

- Capa Red. Esta capa incluye lo que para la mayoría de los usuarios es el modelo de simulación. Incluye las máquinas, *buffers*, caminos y productos a transformar. Explícitamente, se eliminan los datos que controlan el rendimiento, las lógicas que toman decisiones y, si es posible, la representación externa. Aislar esta capa de otras permite concentrarse en el diseño y la estructura del flujo, lo que facilita el uso de partes de simulación en diferentes contextos.
- Capa Lógica. Esta capa incluye procesos de toma de decisiones. Los diferentes procedimientos se programan utilizando paquetes estándar. Estos procedimientos pueden activar otros procedimientos de decisión, o incluso elementos en la capa de red. En una fábrica habitual, esta capa representaría los sistemas de control y planificación de operaciones, que incluirían los procesos de planificación y secuenciación y el sistema de control del equipo de manejo de materiales.
- Capa de Base de Datos. En la mayoría de las configuraciones operativas, puede ayudar considerar a los ERP como una base de datos transaccional que

contiene toda la información necesaria para realizar los procesos. La capa de la base de datos sigue esta idea. La capa de base de datos es una base de datos que alimenta las simulaciones con los datos necesarios para realizar actividades y tomar decisiones. La información almacenada no solo son los parámetros necesarios para la capa de red, sino también los resultados de los cálculos y los indicadores de rendimiento. Para construir la capa de base de datos por separado se requiere diseñar el sistema cuidadosamente para evitar incluir datos en las capas lógica y de red.

- Capa Visual. La capa visual se incluye en la mayoría de los paquetes de simulación con la capa de red, y facilita la comunicación con los usuarios. Sin embargo, los usuarios en las organizaciones pueden requerir de ayudas visuales complementarias. Una característica específica de esta propuesta incluye pizarras y otros elementos coloreados (*andon*) en la simulación. Los elementos *andon* de color permiten que las máquinas informen sobre su estado, pero también pueden ilustrar la congestión en un pasillo determinado, el estado de un almacén o el tamaño de la cola en la estación de camiones de remolque.

La capa lógica junto con la capa de base de datos, configuran el sistema de información de un sistema real. Mientras tanto, las capas de red y visual están relacionadas con el sistema físico. Se puede concluir que la información y los flujos de material con esta configuración están representados explícitamente para permitir una mejor comprensión de los procesos reales³.

5.3 Propuesta de herramientas de evaluación cualitativa de la seguridad

Además de cuantificar el tráfico, una evaluación cualitativa enriquecerá los resultados al considerar otras restricciones como los pasillos con flujo mixto (trabajadores, tráileres remolcadores, carretillas elevadoras y carretillas remolcadoras), como la dirección de los pasillos, las necesidades de gestión de tráfico para manejar con un alto volumen de movimientos o la iluminación de los puestos de trabajo entre otros, disminuirá la posibilidad de incidentes durante el suministro. Esta situación podría causar dos consecuencias: pérdida de productividad en las líneas de montaje y falta de seguridad para los trabajadores.

³ La conexión entre las capas se puede encontrar en el apartado de anexos.

En los trabajos revisados no se ha encontrado ninguna herramienta concreta para prevenir los efectos de los elementos de manutención más allá del protocolo propuesto por Sáez Más et al. (2016) y las 50 preguntas clave que propone Horberry (2011) sobre la gestión del tráfico de los elementos de manutención en planta. En este último trabajo, el autor plantea como posibles líneas de trabajo futuro una iteración de las preguntas de evaluación, realizar una propuesta de principios y buenas prácticas sobre un diseño seguro para la gestión del tráfico y la propuesta de una herramienta de auditoría de la gestión del tráfico para fábricas.

Según el conocimiento de la autora de esta tesis, las propuestas de Horberry (2011) no se han llevado a la práctica por lo que en este capítulo se propone una herramienta de auditoría cualitativa basada en las 50 preguntas de Horberry (2011) y el protocolo de Sáez Más et al. (2016), pero adaptado a las necesidades reales para evaluar sistemas de suministro de material o la logística interna de plantas de montaje.

La estructura de la herramienta de auditoría propuesta en esta tesis está formada por 44 preguntas en forma de rúbrica, en la que el usuario únicamente tiene que seleccionar aquella respuesta que más se aproxime a la situación real de la planta.

Dentro de la herramienta de auditoría se han identificado 4 dimensiones asociadas al movimiento de material de carácter cualitativo, como son (1) el entorno de trabajo, (2) las tareas de trabajo, equipos y políticas, (3) el personal de trabajo y (4) los elementos de manutención. En los diseños de calidad el flujo de material se ha analizado previamente, consiguiendo movimientos cortos y controlados entre secciones, donde se intenta reducir el número de retrocesos, tipos de flujo y cruces entre ellos. Separar la evaluación de riesgos en 4 dimensiones permitirá conocer la causa que origina la disfuncionalidad.

A continuación, se describe brevemente cada una de las agrupaciones de preguntas:

- Entorno de trabajo (24 preguntas). Evalúa el estado del espacio de trabajo, desde el diseño de la instalación, su seguridad, los caminos, rutas y señales, los accesos de las plantas y los cruces entre los diferentes flujos. Cada zona se evaluará en función de la estructura del pasillo de los medios de manutención y del personal. Por ejemplo, el número de carriles, sentido de conducción, giros, cruces o la correcta señalización de estos. Las condiciones del entorno de circulación tendrán un efecto a la hora de desarrollar las actividades, como por ejemplo una correcta señalización o iluminación del

espacio de trabajo, visibilidad, el estado del pavimento o control sobre la velocidad.

- Tareas de trabajo, equipos y políticas (11 preguntas). Evalúa la seguridad del entorno y su prevención, también las políticas de conducción dentro de la planta y el proceso de carga de material. Una zona únicamente de paso podrá albergar mayor capacidad de movimiento o dobles sentidos, en cambio, pasillos en los que se den actividades de carga y descarga, maniobras, paso de peatones, se valora positivamente carriles con un único sentido de conducción y un menor volumen de tráfico para evitar atascos o retrasos debidos a la actividad.
- Seguridad del personal de trabajo (5 preguntas). Evalúa la formación de los trabajadores en cuanto a seguridad y cómo se integra la seguridad en el proceso de trabajo diario. Se intenta conocer si existen protocolos de seguridad establecidos para los trabajadores, para el personal externo que visita la planta, etc. y cómo se aplican entre el personal.
- Elementos de mantenimiento (4 preguntas). Estas preguntas pretenden conocer qué tipo de elementos de mantenimiento intervienen en el suministro (elevadoras, remolcadoras, autoguiados, etc.) y cómo pueden afectar a la seguridad. Esta información es relevante desde el punto de vista de la longitud y la actividad que realicen.

El cuestionario se encuentra descrito en detalle en los anexos del documento 11.2. En algunas preguntas, se pregunta de forma general si la iluminación o el nivel de ruido son adecuados para desempeñar el trabajo, sin embargo, no se especifica el valor de los niveles recomendados, ya que la respuesta depende de la normativa vigente a aplicar. En este caso deben responderse teniendo estos valores en cuenta. Asimismo, la propia fábrica puede tener unos niveles de seguridad exigidos más restrictivos como puede ser para la velocidad, ruido, señalización entre otros, que también deberán tenerse en cuenta a la hora de responder a las preguntas. De este modo, en la aplicación del cuestionario, cada fábrica considerará los niveles de seguridad seguidos.

5.4 Propuesta de metodología de evaluación de la seguridad y el tráfico de la logística interna

El Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT) describe del siguiente modo la evaluación de riesgos:

“La evaluación de riesgos es la actividad fundamental que la Ley establece que debe llevarse a cabo inicialmente y cuando se efectúen determinados cambios, para poder detectar los riesgos que puedan existir en todos y cada uno de los puestos de trabajo de la empresa y que puedan afectar a la seguridad y salud de los trabajadores.”

Para el INSHT esta evaluación tiene como objetivo fundamental minimizar y controlar aquellos riesgos que no se han podido eliminar, proponiendo medidas preventivas y de actuación ante las posibles consecuencias. Además, también destacan que esta actividad se debe realizar por personal cualificado y siguiendo un procedimiento establecido.

La metodología de evaluación de la logística interna en fábricas de automóviles que se propone en este capítulo se basa en el nivel de seguridad y el tráfico estimado, tanto cualitativo como cuantitativo, y que permitirá evaluar el estado de las instalaciones y del sistema de suministro interno. Esta metodología se basa en lo anteriormente propuesto en cuanto a medibles y herramientas de estimación. Además, según se necesite, esta metodología se acompañará de otras estimaciones cuantitativas sobre la eficiencia del sistema.

Esta metodología de evaluación surge del trabajo de investigación previamente realizado y de su correspondiente aplicación iterativa en varios proyectos sobre la evaluación y diseño de sistemas de aprovisionamiento en cuanto al tráfico y seguridad. En este capítulo se ha documentado y definido el proceso final ideal a seguir ante un nuevo caso de evaluación del suministro en plantas de montaje. La Tabla 24 presenta cada una de las 6 fases y las diversas tareas a realizar en cada una de ellas. En los siguientes apartados se explicarán en detalle cada una de ellas.

Tabla 20. Fases a seguir al aplicar la metodología propuesta.

FASE	DESCRIPCIÓN	ETAPAS
Fase 1	PRELIMINAR	1.1 Identificación de problema y del objetivo. 1.2 Preparación del equipo 1.3 Recogida de datos. 1.4 Identificación de los flujos y cuantificación estática de estos.
Fase 2	DISEÑO (si fuera necesaria)	2.1 Diseño preliminar. 2.2 Modelado del problema. 2.3 Modelo de optimización.
Fase 3	ESTIMACIÓN CUANTITATIVA	3.1 Modelar alternativa/as en software de simulación por eventos discretos. 3.2 Definir medibles del tráfico necesarios 3.3 Identificar zonas a evaluar. 3.4 Incluir elementos <i>andon</i> en el modelo y realizar la experimentación
Fase 4	ESTIMACIÓN CUALITATIVA	4.1 Recorrer la planta. 4.2 Seleccionar zonas de muestra y recoger datos de las zonas de muestra. 4.3 Aplicar el cuestionario de la herramienta de auditoría.
Fase 5	EVALUACIÓN	5.1 Evaluar los resultados de la estimación cuantitativa 5.2 Evaluar resultados de la estimación cualitativa. 5.3 Identificar y documentar puntos críticos.
Fase 6	DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	6.1 Comparar alternativas y validar diseño (si fuera necesario). 6.2 Proponer mejoras a la alternativa final para tratar de reducir el tráfico y aumentar la seguridad. 6.3 Plantear una posible monitorización del entorno después de una implantación.

Fuente: Elaboración propia

5.4.1 Fase 1: Preliminar

En una primera fase denominada ‘preliminar’ se iniciará el proyecto en cuestión (ver Tabla 25).

Tabla 21. Tareas a realizar durante la primera fase de la metodología.

Fase 1	PRELIMINAR	1.1 Identificación del problema y del objetivo. 1.2 Preparación del equipo 1.3 Recogida de datos. 1.4 Identificación de los flujos y cuantificación estática de estos.
--------	------------	---

Fuente: Elaboración propia

1.1 Se busca identificar cuál es el problema de suministro a tratar (evaluación de los flujos, optimización de instalaciones o del flujo de material, control del tráfico, capacidad de instalaciones, seguridad del entorno, eficiencia del suministro etc.) y la definición del objetivo de aplicar la metodología en sí. Es importante tener claro con qué objetivo se realiza el trabajo para poder seleccionar correctamente los medibles, y tratar de dar respuesta con ellos al problema.

1.2 A continuación, se preparará el equipo de trabajo a intervenir. En este caso, sería necesario un experto en un software de simulación por eventos discretos, un experto en sistemas de suministro (en particular del aprovisionamiento a líneas de montaje) y un experto en la metodología. Estas tres figuras no tienen por qué estar representados por 3 personas diferentes.

1.3 Para la recogida de datos, serán necesarios:

- Planos a escala y localizaciones de las instalaciones a evaluar.
- Referencias de piezas a considerar, sus consumos diarios por vehículo de la línea, capacidad de los contenedores en los que se entregan, política de entrega, puntos de origen en almacenes o células y puntos de entrega en células o línea de montaje.
- Datos de los elementos de mantenimiento: tamaño de la flota, tipo de elemento de mantenimiento, tiempos de carga/descarga, capacidad, etc.
- Otros datos como la producción diaria de la línea, horas y turnos de trabajo, otros movimientos de cajas, vacíos, patines, protectores, etc.

1.4 Para identificar los diferentes flujos de materiales, se consultará a la planta por las diversas políticas de suministro que utilizan. Se entiende como flujo a cada

política de suministro y sus variantes, ya que una misma política puede tener unos puntos de origen (almacenes o células) y destino (células o línea de montaje) diferentes, y, por lo tanto, interferir en diferentes zonas de la planta.

Se tratará de asociar a cada política, qué referencias siguen cada tipo de política, el tipo de elemento de manutención a utilizar, el trayecto que siguen a lo largo de la planta desde su origen de almacenamiento hasta su correspondiente entrega en la línea o célula de consumo.

Para estimar cuantitativamente la cantidad de movimientos que realiza cada flujo, se requerirá utilizar los siguientes datos recogidos: (1) el consumo diario de cada referencia y (2) la capacidad del contenedor. Al dividir el consumo diario entre la capacidad de los contenedores, se puede conocer la cantidad de entregas diarias necesarias para cada referencia. Además, conociendo la ruta de transporte, se puede conocer el impacto promedio que tendrá dicho flujo en los diferentes pasillos, accesos o zonas de la planta en cuestión. Para la representación de estos cálculos se puede recurrir a una hoja Excel.

También será necesario realizar un boceto de la planta para identificar la ruta de los flujos y conocer dónde se generarán los movimientos estimados y si coinciden uno o varios de los flujos o existen cruces entre ellos.

5.4.2 Fase 2: Diseño

En aquellos casos en los que no solo se desee evaluar la situación actual, sino que se requiera de proponer un nuevo diseño de suministro o cambiar la asignación/localización de algunas instalaciones, se llevará a cabo una etapa de diseño. En esta etapa, se podrá realizar un modelo de optimización, diseño de *layout* o la definición de la topología de los pasillos entre otros, según sea necesario (Tabla 26). Si fuera muy extensa, se puede documentar esta tarea como una fase independiente.

Tabla 22. Tareas a realizar durante la segunda fase de la metodología.

Fase 2	DISEÑO (si fuera necesaria)	2.1 Diseño preliminar. 2.2 Modelado del problema. 2.3 Modelo de optimización.
--------	--------------------------------	---

Fuente: Elaboración propia

2.1 Documentar el diseño actual de la planta y qué posibilidades de cambio en el diseño de las instalaciones y de gestión se podrían o querrían evaluar por parte de la planta como punto de partida. En este caso, plantear posibles opciones de diseño de las instalaciones a optimizar y validar.

2.2 Modelar el diseño actual de la planta y la/las diferentes opciones del problema anteriormente mediante programación matemática.

2.3 Proponer el modelo de optimización completo y flexible para evaluar las diferentes opciones. Una vez modelado el problema y en función de los resultados, se podrían sugerir nuevas opciones de diseño y comenzar iterativamente esta fase si fuera necesario y deseado por la planta.

5.4.3 Fase 3: Estimación cuantitativa

En esta fase, se cuantificará el tráfico y los movimientos existentes en el sistema de suministro a evaluar o diseñar (ver Tabla 27).

Tabla 23. Tareas a realizar durante la tercera fase de la metodología.

Fase 3	ESTIMACIÓN CUANTITATIVA	<p>3.1 Modelar alternativa/as en software de simulación por eventos discretos.</p> <p>3.2 Definir medibles del tráfico necesarios</p> <p>3.3 Identificar zonas a evaluar.</p> <p>3.4 Incluir elementos <i>andon</i> en el modelo y realizar la experimentación</p>
-----------	----------------------------	--

Fuente: Elaboración propia

3.1 En primer lugar, se modelarán la/as alternativa/as a deseadas en el software de simulación. En aquellos casos en los que se haya realizado anteriormente la fase de diseño con herramientas de optimización, es interesante combinar y conectar ambas herramientas para facilitar el proceso de simulación de alternativas.

La construcción del modelo debe comenzar con la incorporación del plano de la planta a escala para poder trazar los caminos entre ubicaciones con su distancia real. También se debería añadir los diferentes almacenes, células, la línea de montaje, cruces de peatones y las flotas de carretillas. Esto correspondería con la red del modelo simulación.

Un ejemplo sencillo de la lógica del modelo y de la base de datos, sería conocer el consumo diario de cada referencia, la capacidad de los contenedores, y el *takt time*

de la línea de montaje. Con estos valores, y conociendo el punto de origen y de entrega de cada referencia, y los tiempos de las actividades logísticas, se puede programar cuando se debe generar una salida de material desde cada punto de origen. El modelo se puede complementar incluyendo otras actividades como es la creación de rutas de elementos de mantenimiento que recogen varios contenedores en diferentes puntos de origen o consumo, u otras consideraciones logísticas que puedan resultar de interés en la evaluación.

3.2 A continuación, se deben seleccionar aquellos medibles a estimar tanto del tráfico (congestión, intensidad o volumen) como de eficiencia si fueran necesarios (tiempo de transporte, número de entregas horaria, etc.) y cuando capturarlos (diario, horaria, promedio, máximo o mínimo). Estos medibles se han presentado en los apartados anteriores.

Por ejemplo, si hay un acceso a la planta concurrido por varios flujos de materiales con elevada cantidad de movimientos será necesario conocer la intensidad horaria. Si, además, ese acceso consta de un paso de peatones y los elementos de mantenimiento han de ceder el paso, conviene conocer la congestión media y máxima, ya que varios elementos de mantenimiento parados podrán influir en esta. Si interesara evaluar la eficiencia convendría conocer cómo afecta una posible congestión en un acceso a las entregas a tiempo a la línea evaluando un medible de tiempo de retraso en la entrega.

3.3 Con ayuda de la estimación estática y la representación de los flujos realizados en la fase 1, se podrán identificar a priori, qué tramos, pasillos o accesos conviene evaluar de la planta.

3.4 Una vez identificadas las zonas, el modelo de simulación deberá incluir los elementos *andon* que representen los medibles del tráfico deseados. Estos elementos permiten representar el valor de los medibles requeridos. Con esta información recogida en el modelo, se pueden realizar la experimentación.

Se recomienda que cada elemento *andon* tome una forma diferente de acuerdo al medible que represente. Cada medible adoptará un color diferente según el valor que experimente dentro de los intervalos establecidos. Esto permitirá al usuario final conocer qué representa cada uno de los elementos *andon* con sus colores y formas e incluso poder compararlos con la situación actual existente en otras partes de la planta.

5.4.4 Fase 4: Estimación cualitativa

En una cuarta fase, se hará uso de la herramienta de auditoría propuesta anteriormente después de haber recorrido completamente la planta (ver Tabla 28).

Tabla 24. Tareas a realizar durante la cuarta fase de la metodología.

Fase 4	ESTIMACIÓN CUALITATIVA	4.1 Recorrer la planta. 4.2 Seleccionar zonas de muestra y recoger datos de las zonas de muestra. 4.3 Aplicar el cuestionario de la herramienta de auditoría.
--------	------------------------	---

Fuente: Elaboración propia

4.1 Para un correcto uso de la herramienta se deberá recorrer la planta completa para tener una visión global del entorno, conocer cómo se realizan las actividades logísticas, qué tipo de pasillos contiene desde un punto de vista de seguridad.

4.2 Seleccionar aquellas zonas que servirán de muestra para responder al cuestionario según sean más representativas de la planta o alberguen un mayor movimiento de material.

4.3 Se recogerán los datos de las zonas seleccionadas. Para ello, se deberán leer las preguntas con detenimiento previamente para saber qué tipo de información necesitaremos.

Una vez recopilada la información sobre cada pregunta se debería seleccionar el nivel (1-4) que más se ajuste a la situación real observada, siendo el 1 el peor caso posible y 4 la situación ideal recomendada. Lo conveniente sería que las respuestas se encuentren entre los niveles 3 y 4. En caso contrario, las propias respuestas darán ideas de cómo se podrá mejorar la seguridad de la logística. Durante el uso de la herramienta conviene utilizar la representación realizada en la fase 1 que identifica cada uno de los flujos, pasillos, instalaciones, cruces, etc.

5.4.5 Fase 5: Evaluación

En esta fase se llevará a cabo la evaluación siguiendo las tareas propuestas en la Tabla 29.

5.1 Evaluar los resultados cuantitativos de la fase preliminar y la simulación. Esta tarea se debe de acompañar de gráficos significativos de los medibles, imágenes de los resultados de simulación para los elementos andon.

5.2 Evaluar los resultados de la estimación cualitativa de los resultados de la fase preliminar y de la herramienta cualitativa para cada una de las alternativas. Esta tarea se debe de acompañar de gráficos significativos de los resultados de la herramienta cualitativa.

5.3 Identificar aquellas zonas definidas como puntos críticos, bien por experimentar un elevado valor del tráfico, o que su diseño conste de intersecciones o giros entre flujos, y, por lo tanto, requieran de una evaluación con mayor nivel de detalle.

Tabla 25. Tareas a realizar durante la quinta fase de la metodología.

Fase 5	EVALUACIÓN	<p>5.1 Evaluar los resultados de la estimación cuantitativa</p> <p>5.2 Evaluar resultados de la estimación cualitativa.</p> <p>5.3 Identificar y documentar puntos críticos.</p>
--------	------------	--

Fuente: Elaboración propia

Tabla 26. Tabla de evaluación de los puntos críticos en la fase de evaluación de la metodología.

Flujo	Medibles	S/mov
Identificar cada uno de los flujos	Medibles seleccionados y estimados en dicha sección.	Segundos que transcurren entre un movimiento y el siguiente.
Descripción de entorno		
Identificar los tipos de flujos y la actividad que realizan en este punto crítico. Describir el entorno del punto crítico.		
Problemas de seguridad		
Identificar cada uno de los posibles problemas de este punto que puedan afectar a la seguridad, como un elevado volumen de movimientos, cruces entre flujos, pasillo estrecho, etc.		
Recomendaciones		
Proponer ideas de mejora para reducir el tráfico o aumentar la seguridad. Esto se hará de acuerdo a los resultados obtenidos y las ideas dadas por la herramienta cualitativa.		

Fuente: Elaboración propia

Para documentar cada uno de los puntos críticos, se propone completar la siguiente tabla para cada uno de ellos donde se recogerán los diferentes flujos, la cantidad de movimientos que alberga cada sección, la descripción del entorno y los problemas

de seguridad detectados (ver Tabla 30). El último apartado de recomendaciones se completará en la última fase de la metodología.

5.4 Los datos recogidos en esta tabla permitirán evaluar en detalle cada punto crítico y validar o no los diseños. Una propuesta se puede considerar inviable si en varios tramos experimenta un elevado volumen de movimientos, cruces o congestión entre otros, que previenen que su implementación puede suponer un riesgo para los trabajadores o para garantizar el suministro a tiempo.

5.4.6 Fase 6: Discusión de los resultados

En esta fase, con ayuda de los medibles y de los datos recogidos y evaluados en la etapa anterior, se discuten los resultados globales obtenidos (ver Tabla 31).

Tabla 27. Tareas a realizar durante la sexta fase de la metodología.

Fase 6	DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	<p>6.1 Comparar alternativas y validar diseño (si fuera necesario).</p> <p>6.2 Proponer mejoras a la alternativa final para tratar de reducir el tráfico y aumentar la seguridad.</p> <p>6.3 Plantear una posible monitorización del entorno después de una implantación.</p>
-----------	--------------------------------	---

Fuente: Elaboración propia

6.1 Una vez evaluados los resultados se decide qué alternativa de diseño (si fuera necesario) será la más recomendable desde el punto de vista de factibilidad del tráfico, seguridad y eficiencia.

6.2 Se discutirán los resultados para poder seleccionar y proponer cuál/cuáles se recomienda implantar (si fuera necesario), así como posibles hallazgos y recomendaciones a considerar. Las recomendaciones propuestas tratarán de mejorar la situación del tráfico o seguridad de la actual o las alternativas de diseño evaluadas. Completar la sección de la Tabla 30 de 'Recomendaciones' anteriormente no cumplimentada.

Para ello se recomienda tener presentes algunos principios de diseño eficiente y seguro de los sistemas de suministro. Las preguntas de la herramienta de auditoría proporcionan una idea de aquellos aspectos del diseño que tienen un efecto negativo sobre la seguridad del movimiento de material. Tanto en la fase 1 preliminar como en esta fase 5 de discusión de los resultados y toma de decisiones se deberían considerar algunos principios de diseño como son:

- Proponer diferentes alternativas en las que se identifiquen la red de pasillos y se evalúe la direccionalidad de estos, los tipos de medios de manutención, los accesos y los cruces entre flujos entre otros aspectos. Lo ideal son flujos con movimientos simples y lo más directos posibles, evitando cruces y giros siempre que sea posible o añadiendo elementos de seguridad en el caso de que no sea posible evitarlos, como señalización, políticas de conducción, rotondas, semáforos, etc.
- Identificar, durante el diseño/rediseño de sistemas de suministro, los movimientos de entrada y de salida a la instalación y hacer una estimación previa del volumen diario por flujo. Esto es relevante porque, por ejemplo, en células de secuenciado o *kitting* en general donde los productos se montan dentro de una carcasa y la cantidad de palés a suministrar es bastante inferior con la cantidad de viajes de salida que se realizan con los kits. También es importante hacer una estimación previa de los movimientos que genera cada flujo para ver si las dimensiones de los accesos disponibles y su ubicación son los adecuados para dar paso a ese volumen de movimientos.
- Aligerar el tráfico, si se sabe que un pasillo va a estar muy congestionado, igual conviene aligerar el tráfico convirtiéndolos de un camino de una sola dirección o desviando alguno de los flujos por otra zona. Esto tendrá un efecto en la eficiencia, pero se aseguran y mantienen las entregas deseadas y aligera el tráfico. Se pueden establecer valores máximos deseados para los medibles cuantitativos o también establecer políticas de conducción: solo se entra en un pasillo de línea si voy a entregar, sino utilizar los pasillos de entrada y salida.

6.3 Durante la etapa de post-implantación se recomienda la monitorización del suministro de la planta, para comprobar cómo se está llevando a cabo correctamente la implantación. Del mismo modo que, si se desean realizar pequeños cambios futuros, introduciendo las modificaciones en el modelo de simulación, la base de datos o la herramienta cualitativa, se pueden obtener nuevos resultados para comprobar que el sistema se mantiene estable. Por el contrario, si los cambios son drásticos se recomienda volver a realizar el análisis completo.

5.5 Conclusión

Este capítulo surge tras las revisiones realizadas en capítulos anteriores, en los que se ha visto que la seguridad y el tráfico son dos temas poco tratados conjuntamente

a la hora de evaluar y diseñar sistemas de suministro, pero, sin embargo, son relevantes para el correcto funcionamiento de la planta.

De este modo, el objetivo de este capítulo es proponer una metodología de evaluación de la seguridad y el tráfico generado por los sistemas de suministro en planta. Esta metodología surge después de un proceso iterativo de *action research* en el que se enfrentaron varios casos reales sobre esta temática y que se presentarán en los próximos capítulos.

La evaluación se realiza cuantitativa y cualitativamente, para ello, se proponen qué herramientas utilizar para cuantificar el movimiento de material (simulación y optimización) y varios medibles basados en la ingeniería del tráfico como son la intensidad, el volumen y la congestión. En cuanto a los aspectos cualitativos, se ha propuesto una herramienta de auditoría basada en 2 trabajos previamente publicados.

La metodología consta de 6 fases, una fase preliminar donde se define el alcance del caso, se forma el equipo, se recoge la documentación necesaria, se realiza una estimación estática previa para conocer el sistema. Si fuera necesario se propone una segunda etapa para proponer y optimizar alternativas de diseños.

A continuación, en una tercera fase, se estima el tráfico con ayuda de la simulación por eventos discretos. Para ello, es necesario realizar el modelo o modelos (en el caso de que se quiera evaluar más de una alternativa de diseño) y definir e implementar qué medibles resultarán de interés. El uso de los elementos andon, ayudarán a visualizar y representar los valores de los medibles del tráfico. También se pueden simular otros medibles para conocer la eficiencia del modelo si fueran necesarios.

La seguridad se estimará con ayuda de una herramienta de auditoría en la tercera fase de la metodología. Esta herramienta consta de 44 preguntas distribuidas en 4 categorías denominadas (1) entorno de trabajo, (2) tareas de trabajo, equipos y políticas, (3) seguridad del personal de trabajo y (4) elementos de manutención.

En la cuarta fase, con toda la información del modelo de simulación de las preguntas de auditoría, se evaluará el sistema de suministro como tal. Se identificarán los principales puntos críticos que sea conveniente estudiar con mayor nivel de detalle. Para ello, se propone el uso de una tabla que recoge toda esta información para cada uno de los puntos seleccionados. Esta evaluación servirá para validar los diseños y alternativas.

Finalmente, en la quinta y última fase de la metodología, se discutirán los resultados de la alternativa seleccionada o del diseño inicial a evaluar y se propondrán medidas concretas para tratar de suavizar aquellos tramos donde el tráfico o el diseño no se puedan cambiar.

6 CASO DE ESTUDIO 1

6.1 Introducción

Este capítulo presenta un caso de estudio real sobre el rediseño estratégico de la logística interna de una fábrica de montaje de automóviles europea mono producto⁴. Este caso tiene la particularidad de ser un caso estratégico en el que se aprecian diversos factores a considerar a la hora de realizar un diseño y evaluación macro de la logística interna. En concreto, el caso se refiere a la gestión de los componentes y el flujo de piezas para alimentar las diferentes estaciones de trabajo de las líneas de producción.

El flujo de componentes comienza en los muelles de recepción donde llegan los camiones de los proveedores. Los componentes que se descargan de los camiones se mueven a una o varias áreas de almacenamiento mediante equipos de manipulación adecuados. Finalmente, los componentes se transportan al punto de demanda ubicado a lo largo de la línea de ensamblaje cuando sea necesario. Durante este proceso aparecen una serie de restricciones y medidas que pueden favorecer el rendimiento del transporte general, como es la ubicación de los componentes en los almacenes, la asignación de los proveedores en los muelles de descargas o los tipos de elementos de manutención a utilizar. Por lo que se va a proponer un modelo matemático para tratar de mejorar la eficiencia del suministro de material desde los muelles hasta los diferentes puntos de consumo y proponer diversas alternativas en los modos de suministro y asignación de material e instalaciones.

El resto del capítulo se estructura como sigue. La siguiente sección presenta una descripción del caso de estudio. Después se plantea la propuesta de mejora al caso. Más tarde se modela el problema y se propone una formulación matemática. A continuación, se presentan experimentos numéricos y se discuten los resultados obtenidos. Finalmente se presentan las conclusiones y algunas limitaciones del modelo propuesto.

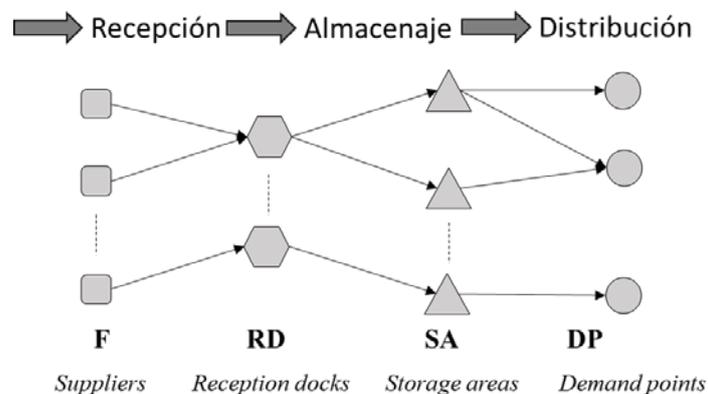
⁴ Una versión similar de este trabajo ha sido aceptada para su publicación en CAIE y están pendiente de publicación en el momento.

6.2 Descripción del caso de estudio

Este caso considera una fábrica de ensamblaje de automóviles dividida en varias líneas de principales o áreas de producción, de aquí en adelante conocidas como puntos de demanda (DP), cada una de las cuales incluye una gran cantidad de estaciones de trabajo donde se ensamblan las piezas. Estos puntos de demanda corresponden con la línea de montaje final, la línea de montaje de motores, la línea de las ruedas y diferentes áreas de montaje de subcomponentes secuenciados.

Todos los días, se reciben y descargan docenas de camiones de diferentes proveedores en los muelles de recepción de la planta (RD). Una flota de carretillas elevadoras mueve los componentes y piezas recibidos desde los muelles hacia las distintas áreas de almacenamiento (SA) de la planta. Simultáneamente, cada estación de trabajo de los DP requiere un número dado de piezas que se suministran por una flota de carretillas remolcadoras desde los SA. Todos los transportes entre las diferentes etapas la realizan diversas flotas de carretillas remolcadoras con capacidad para dos soportes por viaje, en algunos casos la capacidad podía llegar a ser de 4 soportes por viajes. Este flujo está representado en la Figura 9.

Figura 9. Flujo del suministro de material dentro de la planta de fabricación de automóviles.



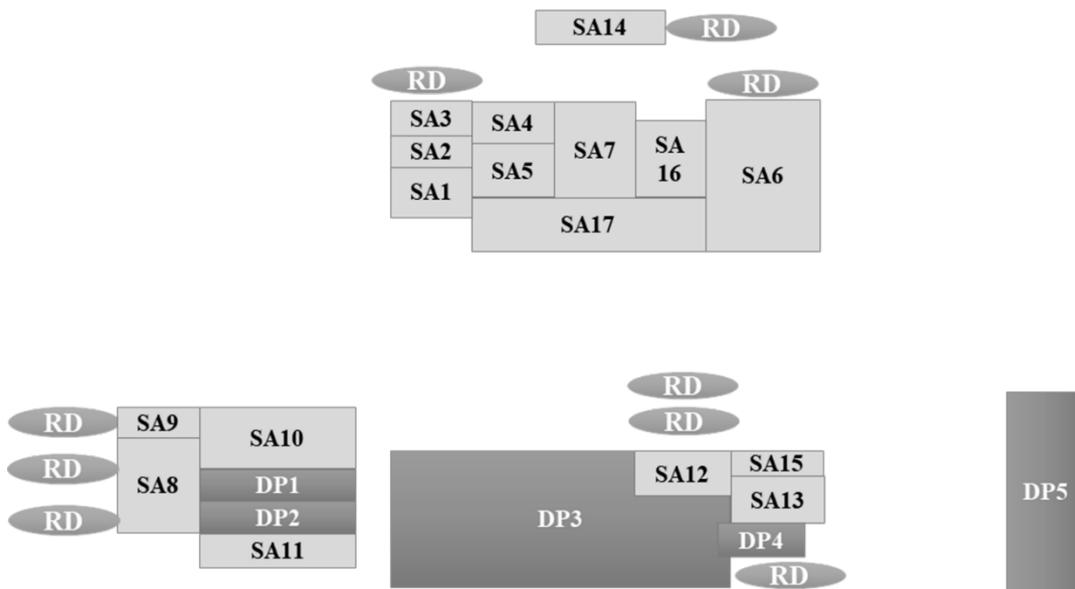
Fuente: Elaboración propia

La fábrica, originalmente diseñada por otro fabricante de automóviles hace varias décadas, ha visto cómo el aumento en la complejidad, en términos de número de variantes a ensamblar y la falta de espacio cerca de la línea de montaje, ha dificultado la llegada de piezas y componentes a las estaciones de trabajo de línea.

Recientemente se han agregado nuevas áreas de almacenamiento para almacenar las piezas y componentes, pero la ubicación de este inventario hace que, en algunos casos, las piezas se mantengan a una distancia de hasta 900 metros de sus puntos de consumo. Mientras tanto, otras áreas de almacenamiento más cercanas a los

puntos de consumo están ocupadas con materiales de movimiento menos frecuentes. Por ejemplo, se sabe que una instalación de supermercado kanban, que genera 12 rutas con 54 entregas por día está ubicada junto de la línea de montaje principal, mientras que un componente particular que genera cientos de movimientos diarios se almacena a 600 metros de la estación de trabajo donde se requieren. El diseño de la fábrica se muestra en la Figura 10.

Figura 10. Distribución en planta de la fábrica de automóviles con los muelles de recepción (RD), áreas de almacenaje (SA) y puntos de demanda (DP).



Fuente: Elaboración propia

Esto se debe a razones políticas de la empresa, por las que los trabajadores de la propia empresa se ubican junto a las plantas de producción y los proveedores se van localizando en los espacios restantes disponibles de la fábrica. Estas ineficiencias en el uso de los recursos logísticos hacen que la fábrica opere con una flota de equipos de mantenimiento y una importante cantidad de personal para satisfacer las necesidades de las líneas.

Durante la ampliación del espacio de almacenamiento no se realizó ningún estudio para decidir la ubicación de los proveedores y de material a cada uno de los nuevos espacios.

6.3 Propuesta de mejora al caso de estudio

Con el fin de mejorar la eficiencia de las actividades logísticas, se propuso (1) reconsiderar la asignación de productos a las áreas de almacenamiento y los

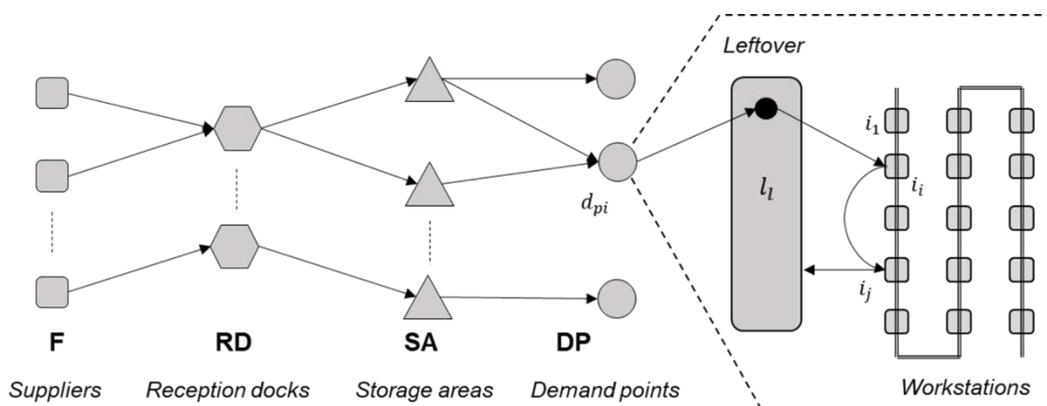
proveedores a los muelles, y (2) contemplar el uso de otros modos de transporte con mayor capacidad.

Sin embargo, se sabe que junto a los pasillos de la línea de montaje solo pueden circular elementos de mantenimiento remolcando hasta 4 plataformas por problemas de seguridad y la flexibilidad de las operaciones, donde los pasillos son estrechos y también trabajan operarios. De este modo, surgió la idea de dividir esta etapa de suministro en dos, mediante la introducción de zonas de transferencia intermedia, en lo sucesivo denominadas "*leftovers*", ubicadas cerca de las líneas de ensamblaje.

Una primera flota de trenes de remolque realizará un transporte de aproximación desde los almacenes hasta los *leftovers* cargando un elevado número de soportes. La idea es aprovechar cada viaje con una mayor carga. Una vez en el *leftover*, una flota de carretillas elevadores se encarga de descargar los soportes de los trenes de gran capacidad y cargarlos en las carretillas remolcadoras de baja capacidad y aptos para circular junto a la línea. Esta flota también se encarga de realizar el proceso inverso con las plataformas vacías que provienen de las estaciones para devolverlos a su almacén de origen.

La segunda etapa de este suministro corresponde con un transporte de entrega del producto a los puntos de consumo. Para ello, una flota de carretillas remolcadoras de baja capacidad, configurarán un pequeño tren de soportes y realizarán el reparto dentro de la línea, recogerán los soportes vacíos y los devolverán al *leftover* para que inicien su proceso de logística inversa y donde iniciar de nuevo un transporte de aproximación. Este flujo de transporte se ilustra en la Figura 11.

Figura 11. Flujo de material desde las entregas de los proveedores externos en los muelles hasta los puntos de demanda en las líneas de montaje.



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con los gerentes de planta, se adoptaron las siguientes suposiciones. En primer lugar, se asumió que la planta recibe todos los días tantos soportes de cada pieza como los que consume. Las conversaciones con los gerentes de la planta confirmaron que la mayoría de los proveedores entregan sus productos diariamente, lo que hace que este supuesto sea bastante realista. En segundo lugar, se consideró solo la logística relacionada con el suministro a la línea de montaje principal y las líneas secundarias conectadas a través del transportador. Otros puntos de demanda en la fábrica, como los supermercados kanban, también se suministran a diario con contenedores llenos, pero generalmente desde áreas de almacenamiento ubicadas junto a ellos. En tercer lugar, se asumió que se asignan trabajadores específicos a cada RD y SA, y son diferentes de los que se dedican al transporte desde un área a otra con los elementos de mantenimiento. El mismo supuesto se aplica a la actividad de los *leftovers*. En cuarto lugar, este caso se centra en la logística que concierne a las piezas que se suministran en palés o contenedores estándar. El sistema de suministro incluye también movimientos de rutas kanban y pre-ensamblajes secuenciados, pero se supone que estas entregas se realizan mediante un sistema de logística específico. En concreto, las rutas de kanban agregan congestión a los pasillos, pero no agregan movimientos (que representan menos de 100 entregas por día). Además, algunos de los productos (neumáticos, sistemas de escape) viajan en bastidores de gran tamaño que no son compatibles con los palés estándar. Actualmente representan alrededor del 2% de los movimientos por lo que no se consideran de manera diferente en el modelo matemático. Por último, cada parte es suministrada por un solo proveedor y, por razones de gestión, cada proveedor se asignará a un único RD.

Este caso describe un problema estratégico de la planta, donde se deben optimizar la asignación de proveedores a los muelles y la asignación de piezas a los almacenes, y decidir el modo del transporte más adecuado entre las diferentes etapas del suministro mientras se consigue un suministro eficiente. De este modo, el problema se planteará como un problema de programación entera mixta.

6.4 Modelado del problema

El problema logístico en planta considerado puede formalizarse de la siguiente manera. Asumamos un conjunto $\mathcal{D} = \{d_1, \dots, d_{|\mathcal{D}|}\}$ de RDs, un conjunto $\mathcal{S} = \{s_1, \dots, s_{|\mathcal{S}|}\}$ de SAs, y un conjunto $I = \{i_1, \dots, i_{|I|}\}$ de DPs. Cada DP i requiere ciertas partes, y para cada conjunto de partes, un número dado de pales d_{pi} . Un conjunto de proveedores $F = \{f_1, \dots, f_{|F|}\}$ visita la planta diariamente. Cada proveedor f

entrega un conjunto de partes $P_f = \{p_v, \dots, p_w\}$, y se supone que una parte dada solo es suministrada por un proveedor.

El número máximo de pales que cada RD puede manejar está limitado a su capacidad diaria. Los soportes descargados en el RD se transportan a las SA, que tienen una capacidad limitada. Hay que tener en cuenta que una pieza determinada se puede almacenar en más de una SA, pero si un DP determinado utiliza una parte determinada, esta parte siempre se suministrará desde el mismo SA para simplificar la complejidad de las actividades de manejo de materiales y transporte.

El transporte de pales de RD a SA se realiza actualmente por una flota de carretillas elevadoras cuya capacidad es de dos pales. Sin embargo, esta tarea también puede ser realizada por trenes de mayor capacidad. En este caso, las carretillas elevadoras deberían ayudar a cargar / descargar pales en las plataformas del tren de remolque. Se consideran varios tipos de trenes remolcadores $m \in M$, con capacidades que van desde 2 hasta 8 pales.

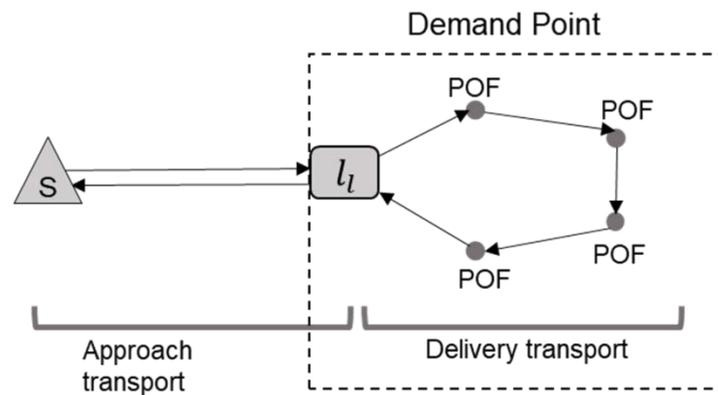
El transporte desde las SA a las estaciones de trabajo se puede realizar mediante diferentes tipos de trenes remolcadores de hasta 16 soportes. Dado que los pasillos internos en los DP no permiten la conducción de remolcadores de más de 4 soportes, los trenes que tengan una capacidad mayor requerirán una parada intermedia en las áreas de *leftover* en el conjunto $L = \{l_1, \dots, l_{|L|}\}$ que se agregarán al sistema si son aplicables o no.

Las áreas de *leftover* están ubicadas cerca de las líneas, desde donde las partes se entregarán, por trenes remolcadores más pequeños, a la estación de trabajo correspondiente. Cuando los conductores llegan a los *leftovers* con un tren grande, tienen que desenganchar las plataformas y enganchar las plataformas vacías (si las hay) para devolverlas a los SA de origen. En el *leftover*, otra flota de carretillas elevadoras está a cargo de cargar soportes desde los trenes de remolque de mayor capacidad a los trenes de remolque de menor capacidad y que sí que pueden circular a través de los pasillos internos para entregar la pieza a la estación de trabajo, como se detallará en el siguiente párrafo.

El flujo de pales procedentes de proveedores hasta la estación de trabajo final en las líneas de ensamblaje a través de las RD, SA y eventualmente a los *leftovers*, se muestra en la Figura 11. La parte derecha de la Figura 11 muestra los detalles de una línea de ensamblaje con 15 estaciones de trabajo y un *leftover* junto a la línea que permite la transferencia de soportes desde trenes de alta capacidad a trenes pequeños que pueden moverse dentro de los pasillos de la línea.

El modelo diferencia dos etapas en la entrega de SA y las estaciones de trabajo, el transporte de "aproximación" desde SA al principio de la línea o el *leftover*, y la ruta de "entrega" a lo largo de los pasillos de la línea (ver la Figura 12). En este modelo general, las rutas hasta las estaciones de trabajo de la línea no se consideran. En su lugar, se estima un coste asociado a la entrega promedio desde los *leftover* a las estaciones y entre estación y estación, según el diseño de la línea, la distancia entre estaciones y la velocidad de circulación permitida. Para estimar dicho tiempo de entrega promedio, se supone que el tiempo requerido para cargar y descargar un tren n es proporcional al número de soportes que transporta y depende del tipo de equipo de mantenimiento. Finalmente, el tiempo para que un tren del tipo m viaje desde la ubicación u a la ubicación v viene dado por el parámetro t_{uv}^m , que depende del tipo de tren (los trenes más pequeños tienen autorizados mayor velocidad) y la distancia entre u y v .

Figura 12. Etapas de suministro desde un SA hasta 4 estaciones de consumo (POF) de un DP.



Fuente: Elaboración propia

El objetivo del problema definido es decidir una nueva asignación de proveedores a RD, una nueva asignación de partes a SA, el modo de suministro que se utilizará en cada RD y SA, para decidir si es necesario o no un *leftover*, de tal manera que el tiempo total de operación del proceso de suministro, que incluye los tiempos de manipulación y transporte, se minimice.

6.5 Modelo programación matemática

En primer lugar, se resumirá la notación de los conjuntos e introducirán los parámetros, las variables de decisión y las variables continuas (no negativas).

Sets

$D = \{d_1, \dots, d_{|D|}\}$ Conjunto de muelles de recepción (RD)

$S = \{s_1, \dots, s_{|S|}\}$ Conjunto de áreas de almacenamiento (SA)

$L = \{l_1, \dots, l_{|L|}\}$ Conjunto de *leftovers* (L)

$I = \{i_1, \dots, i_{|I|}\}$ Conjunto de puntos de demanda (DP)

$L_l = \{i_v, \dots, i_w\}$ Subconjunto de estaciones asignadas a un *leftover* $l \in L$

M Conjunto de tipos de trenes
 $= \{m_1, \dots, m_{|M|}\}$

$F = \{f_1, \dots, f_{|F|}\}$ Conjunto de proveedores

$P_f = \{p_v, \dots, p_w\}$ Conjunto de piezas a enviar por cada proveedor f

Parámetros

d_{pi} Demanda de cada pieza p en cada estación i

t_{uv}^m Tiempo medio de viaje de ida vuelta desde una localización u a una localización v para un tren de tipo m

α_m Número máximo de pales en un viaje de un tren de tipo m

\bar{t}_l^m Tiempo medio de viaje desde un *leftover* l a una estación asignada a este.

H_d Capacidad de manipulación diaria en RD d , en número de soportes.

C_s Capacidad de SA s , en número de pales.

τ_1 Tiempo medio de carga/descarga por una carretilla elevadora.

τ_2 Tiempo medio de coger un pale en un SA y cargarlo sobre un tren.

τ_3 Tiempo medio de descarga de un pale en una estación.

τ_4 Tiempo medio de enganche/desenganche de plataformas en un tren de capacidad 2.

τ_5 Tiempo medio de transferencia de un soporte desde un tren remolcador de gran capacidad a uno de baja capacidad.

Variables

y_{fd} Toma el valor de 1 si el proveedor f se asigna al RD d y 0 en caso contrario.

Q_{pds} Número de pales de la pieza p que llega a un RD d y va a un SA s .

q_{psl} Número de pales de la pieza p que van desde el SA s hasta el *leftover* l .

- K_{ds}^m Número de viajes con el tipo de tren m que envía soportes desde el RD d hasta SA s
- k_{sl}^m Número de viajes con el tipo de tren m que envían desde SA s a un *leftover* l o a α_m estaciones asignadas a él si $m \leq 2$.
- $r_l^{m'}$ Número de viajes de tren de tipo m' que envían pales desde el *leftover* l hasta estaciones asignadas a $\alpha_{m'}$
- T_m^d Tiempo de operación de los operarios realizando las tareas de transporte de soportes desde RD d hasta SAs con trenes de tipo m .
- T_m^s Tiempo de operación de los operarios realizando las tareas de transporte de soportes desde SA s hasta los *leftovers* (o estaciones) con los trenes de tipo m .
- T_m^l Tiempo de operación de los operarios realizando las tareas de transporte de soportes desde un *leftover* l a las estaciones con los tipos de tren m .

De este modo, la formulación matemática se puede enunciar de la siguiente manera:

$$\text{Min} \quad \sum_m \left[\sum_d T_m^d + \sum_s T_m^s + \sum_l T_m^l \right] \quad (1)$$

Sujeto a:

$$d_{pl} = \sum_{i \in l} d_{pi} \quad \forall p, l \quad (2)$$

$$\sum_s q_{psl} = d_{pl} \quad \forall p, l \quad (3)$$

$$\sum_d Q_{pds} = \sum_l q_{psl} \quad \forall p, s \quad (4)$$

$$\sum_p Q_{pds} \leq \sum_m \alpha_m K_{ds}^m \quad \forall d, s \quad (5)$$

$$\sum_p q_{psl} \leq \sum_m \alpha_m k_{sl}^m \quad \forall s, l \quad (6)$$

$$\sum_s \sum_m k_{sl}^m \alpha_m \leq \sum_{m'} \alpha_{m'} r_l^{m'} \quad \forall m > 4, m' \leq 4, l \quad (7)$$

$$T_m^d = \sum_s K_{ds}^m (t_{ds}^m + \alpha_m \tau_1) \quad \forall m, d \quad (8)$$

$$T_m^s = \sum_l k_{sl}^m (t_{sl}^m + \alpha_m (\tau_2 + \tau_3 + \tau_4) + \bar{t}_l^{m'} (\alpha_m + 1)) \quad \forall m, s \quad (9)$$

$$T_m^L = \sum_s \sum_m k_{sl}^m \alpha_m \tau_5 + r_l^{m'} (\bar{t}_l^{m'} (\alpha_{m'} + 1) + \alpha_{m'} \tau_3) \quad \forall m > 4, m' \leq 4, l \quad (10)$$

$$\sum_p \sum_s Q_{pds} \leq H \quad \forall d \quad (11)$$

$$\sum_p \sum_d Q_{pds} \leq C_s \quad \forall s \quad (12)$$

$$\sum_{p \in P_f} \sum_s Q_{pds} \leq y_{fd} \sum_{p \in P_f} \sum_i d_{pi} \quad \forall f, d \quad (13)$$

$$\sum_d y_{fd} = 1 \quad \forall f \quad (14)$$

La función objetivo (1) tiene como objetivo minimizar el tiempo total de manipulación y transporte para satisfacer la demanda diaria de todos los DP. Las restricciones (2) a (4) aseguran que la demanda de cada parte en cada estación de trabajo se haya transportado a los *leftovers* asociados (Ecuación 2), y la continuidad del flujo a través de las SA (Ecuaciones 3) y los RD (Ecuación 4).

Las restricciones de la (5) a (7) “cuentan” el número de viajes para transportar los soportes requeridos entre las etapas del sistema de suministro. Las ecuaciones (5) y (6) estiman en las variables K_{ds}^m y k_{sl}^m los viajes de cada tipo de tren m entre cada muelle de recepción y cada área de almacenamiento, y entre cada área de almacenamiento y los *leftovers*, o a estaciones de la línea si se trata de un tren de baja capacidad (2 unidades de carga) respectivamente. Recordar que los trenes de baja capacidad pueden entregar unidades de carga directamente a las estaciones de trabajo en la línea. Sin embargo, los trenes más grandes deben detenerse en los

leftovers donde los soportes se transfieren a trenes pequeños. Las restricciones (6) cuentan en las variables $r_i^{m'}$ el número de viajes que utilizan esos trenes de tipo m' entre los *leftovers* y las estaciones de trabajo, solo si se utilizan los trenes de elevada capacidad en la etapa anterior. Las restricciones (7) equilibran los viajes de entrada y salida a los *leftovers* con las carretillas de grandes dimensiones y las de pequeñas respectivamente.

Las ecuaciones de la (8) a la (11) calculan el tiempo requerido para realizar las actividades de transporte. La ecuación (8) evalúa el movimiento de los soportes desde los RD a las SA e incluyen el tiempo de ida y vuelta a cada SA multiplicado por la cantidad de viajes más el tiempo de carga y descarga de cada unidad de carga. El tiempo de carga o descarga τ_1 se multiplica por la capacidad del tren.

La ecuación (9) expresa el movimiento de ida y vuelta de los soportes de SA a los *leftovers*. Esta ecuación también calcula el tiempo de recogida de los soportes en el SA y de cargarlas en los trenes, más el tiempo para descargarlas en una estación de trabajo. También estima el tiempo de viaje de ida y vuelta desde los *leftovers* hasta las estaciones de la línea realizadas por trenes de baja capacidad. El tiempo de ida y vuelta para visitar las estaciones de trabajo α_m se ha aproximado en \bar{t}_i^m , que depende del DP en particular y del número de paradas que se deben realizar. Hay que tener en cuenta que los trenes de baja capacidad ($m \leq 4$) no requieren detenerse en los *leftovers*, mientras que los de mayor capacidad sí lo hacen. Esta es la razón por la que los movimientos de unidades de carga desde los *leftovers* a las estaciones de trabajo se expresan en ecuaciones separadas (10).

En el caso de trenes remolcadores de mayor capacidad, la primera parte en la ecuación (10) calcula el tiempo requerido para desenganchar y enganchar las plataformas del tren (cada plataforma lleva dos unidades de carga, aunque puede cargar hasta cuatro), así como el tiempo de transferencia. De cada plataforma a un pequeño tren que distribuirá las unidades de carga a las estaciones de trabajo. La segunda parte de la ecuación (10) estima la distribución de los viajes de ida y vuelta de los soportes teniendo en cuenta la capacidad de los trenes utilizados para llegar a las estaciones de trabajo. Esta es la razón por la que, además del índice m que identifica la capacidad del tren de remolcador, las ecuaciones (10) también usan el índice m' para permitir varias capacidades de trenes de distribución y considerar el movimiento de retorno $\alpha_m + 1$ al resto (ver Figura 12).

Las ecuaciones (11) y (12) limitan el flujo de soportes según la capacidad de manejo de los RD y la capacidad de las SA, respectivamente. Finalmente, las ecuaciones (13)

y (14) aseguran que cada proveedor se asigna a una y solo un muelle. Por un lado, la ecuación (13) obliga al proveedor a la variable de asignación y_{fd} a tomar el valor 1 si al menos un soporte del proveedor f se recibe en el muelle d . Observe que la “M grande” comúnmente utilizada en el lado derecho de la ecuación (13) ha sido reemplazada por un límite superior que no es más que la demanda total de cada parte p . Por otro lado, la ecuación (14) asegura que una y solo una de estas variables de asignación toman el valor uno para cada proveedor.

No hay una prueba formal de complejidad del modelo anterior. Sin embargo, si asumimos que 1) se conoce la asignación de proveedores a RD y 2) el transporte desde las sobras a las DP, entonces el problema puede verse como una variante de un problema de flujo de múltiples productos de coste mínimo donde cada arco es de hecho reemplazado por m arcos alternativos, cada uno representa la capacidad del tren seleccionado para realizar el transporte. Además, dado que el coste del problema depende de la cantidad de veces que se usa cada arco, y de que esto debe calcularse de acuerdo con el flujo en cada arco, se define que el problema no es polinomial (NP-hard) y, por lo tanto, solo se pueden resolver eficientemente mediante *solvers* comerciales instancias de tamaño limitado. De hecho, tomó menos de 24 horas resolver las primeras instancias que se generaron para este problema. Además, reducir las posibles opciones de la capacidad de los trenes a ciertos valores específicos (consultar la sección Aplicación numérica) y consolidar las necesidades de varias estaciones de trabajo en los llamados puntos de demanda llevó a reducciones en el tamaño del problema y que se resolvieran en un tiempo razonable.

6.6 Aplicación numérica

Se ha estudiado el caso real de una fábrica con más de 500 estaciones de trabajo en cinco zonas de montaje principales, 9 RD y 17 SA que, en total, alcanzan más de 60.000 metros cuadrados. En promedio, las líneas de montaje reciben diariamente 4.500 soportes de más de 100 proveedores. Se supone que la fábrica recibe todos los días un número similar de soportes. Aproximadamente, el 85% de la demanda requerida por la línea se suministra por únicamente 11 proveedores y representa el 25% de las referencias. Para mayor claridad, los experimentos numéricos se centrarán exclusivamente en estas piezas y proveedores que tienen el mayor consumo.

Los tiempos de transporte y de manejo del material se han ajustado a los siguientes valores: la velocidad promedio de los trenes remolcadores se estableció en 1,4

metros por segundo. Los tiempos de carga y descarga de las carretillas elevadoras se estimaron en 0,37 minutos respectivamente. Se asume que un tren remocador requiere 0,1 minutos para enganchar y desenganchar una plataforma. También se asumió que el desenganchar y entregar el material en la estación de trabajo requiere de 1 minuto por soporte. Se debe decir que estas suposiciones pueden variar de un DP a otro, e incluso en diferentes períodos del proceso de planificación, ya que la velocidad promedio se ve afectada por la congestión del tráfico y la disponibilidad de los trabajadores.

Los experimentos numéricos tienen como objetivo evaluar el potencial de varias alternativas logísticas teniendo en cuenta la estructura de las etapas de distribución (la reasignación de piezas a las SA) y el uso de equipos de manipulación diversos. Se consideraron tres opciones para las asignaciones de las SA: (1) las actuales denominadas C, (2) las asignaciones de los proveedores a los RD y las asignaciones de las partes a las SA producidas por la formulación matemática denominada M, y, finalmente, (3) M' donde se mantuvieron las asignaciones actuales de proveedores a RD, pero las asignaciones y flujos de partes a SA se decidieron mediante una versión restringida del modelo matemático. En este caso las ecuaciones (15) y (16) estaban deshabilitadas y las variables y_{fd} se convirtieron en parámetros que tomaron los valores de la asignación actual. Lo racional de dicha restricción radica en el hecho de que los gerentes de la planta informaron que la decisión sobre la asignación de proveedores a RD pertenece a un departamento diferente. Por lo tanto, este cambio en la asignación podría tener algunas perturbaciones potenciales para los proveedores que el modelo no puede capturar, pero debe considerarse cuidadosamente.

De acuerdo con el uso de material de manipulación diverso, se deben de diferenciar el transporte desde los muelles a las áreas de almacenamiento, que se puede realizar mediante trenes de capacidad de 2, 4 y 8 soportes, y la distribución desde las áreas de almacenamiento a las estaciones de trabajo. Como se explicó anteriormente, la última parte abarca dos casos: el uso de trenes pequeños, $m = \{2, 4\}$, que pueden alcanzar directamente las estaciones de trabajo dentro del punto de demanda, y en el caso de que los trenes más largos se usen, requieren de utilizar los *leftovers* para ser distribuidos reorganizados utilizando trenes de tamaño pequeño con $m' = \{2, 4\}$. Por lo tanto, los casos potenciales se identificarán con la notación $m/m/m'$ donde los tres valores indican el tamaño de los trenes utilizados en los muelles a las áreas de almacenamiento, las áreas de almacenamiento en las estaciones de trabajo o los *leftovers* (si se utilizan) y los *leftovers* a estaciones de

trabajo (si se utilizan). La Tabla 32 resume los tamaños considerados para el manejo del material.

Tabla 28. Capacidad de los tipos de flotas de trenes según el área de trabajo y el flujo de material.

RP hacia SA	Sin <i>leftovers</i>		Con <i>leftovers</i>	
	SA hacia estaciones	SA hacia <i>leftover</i>	<i>Leftover</i> hacia las estaciones	
2, 4, 8	2, 4	16	2, 4	

Fuente: Elaboración propia.

Cabe destacar que combinando los tres casos de asignación de partes y los posibles tamaños de equipo de manejo de materiales, se generaron un total de 12 configuraciones de las que se evaluó su rendimiento.

Antes de analizar los resultados numéricos, hay que destacar que se ha utilizado el lenguaje C # y las bibliotecas de Gurobi 7.5.2 para resolver la formulación en un ordenador con 8 GB de RAM. Los tiempos de computación para alcanzar soluciones óptimas variaron de 2 a 5 segundos para los problemas que no usan los *leftovers*. Sin embargo, los tiempos aumentaron rápidamente cuando se permitieron los *leftovers*, alcanzando alrededor de 22 segundos para el modelo M 'simplificado, y hasta 3916 segundos para el modelo M.

En la herramienta programada, el usuario selecciona la combinación de manejo de material de asignación deseada y los parámetros asociados. La aplicación informática selecciona la versión requerida del modelo matemático y resuelve el problema. Los resultados se almacenan en una hoja de cálculo de Excel. La herramienta es independiente, es decir, actualmente no está conectada a las bases de datos y herramientas de administración del cliente.

En la Tabla 33 se muestran los resultados obtenidos por las alternativas anteriormente descritas con los casos sin *leftover* (parte superior) y con *leftover* (parte inferior). La columna Tiempo informa el tiempo de transporte diario total (en minutos), mientras que la columna % informa la reducción en el porcentaje del tiempo de transporte total de cada alternativa considerada con respecto al caso base, que consiste en las asignaciones actuales C utilizando exclusivamente trenes de capacidad de 2 soportes en cada etapa de suministro. En particular, la situación actual requiere 62,106 minutos de trabajo por día, lo que corresponde aproximadamente a 130 trabajadores por cada turno de 8 horas por día. Este valor

es ligeramente más bajo que el recuento actual, pero el cliente lo consideró una muy buena aproximación.

6.7 Discusión

Las instancias sin *leftover* se puede observar como si se mantienen los trenes como en la situación actual, la reconsideración de las asignaciones de SA a DP reduce el tiempo de transporte en un 12,80%. Si el modelo puede reconsiderar también las asignaciones de las áreas de muelles y las del almacenamiento, se logra una reducción adicional de 1,30%. Estas son mejoras muy importantes ya que se traducen en aproximadamente una reducción de 16 y 18 empleados, respectivamente. Además, se logran mejoras en el nivel de saturación de todas las configuraciones de equipos de manejo de materiales.

Tabla 29. Tiempo total de transporte para las diferentes configuraciones.

	Modo de suministro			C		M'		M	
	RD-SA	SA-WK	LF-WK	Tiempo	%	Tiempo	%	Tiempo	%
Sin <i>leftover</i>	2	2	-	62106	-	54148	12,80%	53346	14,10%
	2	4	-	49391	20,50%	44902	27,70%	44451	28,40%
	4	2	-	61313	1,30%	53667	13,60%	52882	14,90%
	4	4	-	48598	21,80%	44443	28,40%	44036	29,10%
	8	2	-	59887	3,60%	52196	16,00%	51747	16,70%
	8	4	-	47172	24,00%	43350	30,20%	42957	30,80%
	Modo de suministro			C		M'		M	
	RD-SA	SA-LF	LF-WK	Tiempo	%	Tiempo	%	Tiempo	%
Con <i>leftover</i>	2		2	48627	21,70%	45064	27,40%	44990	27,60%
	2		4	46315	25,40%	42982	30,80%	42908	30,90%
	4	16	2	47833	23,00%	44814	27,80%	44725	28,00%
	4		4	45521	26,70%	42732	31,20%	42642	31,30%
	8		2	46407	25,30%	43814	29,50%	43694	29,60%
	8		4	44096	29,00%	41732	32,80%	41612	33,00%

Fuente: Elaboración propia.

En segundo lugar, como era de esperar, el uso de trenes más grandes conduce a reducciones en el tiempo de transporte. Sin embargo, aumentar el tamaño de los

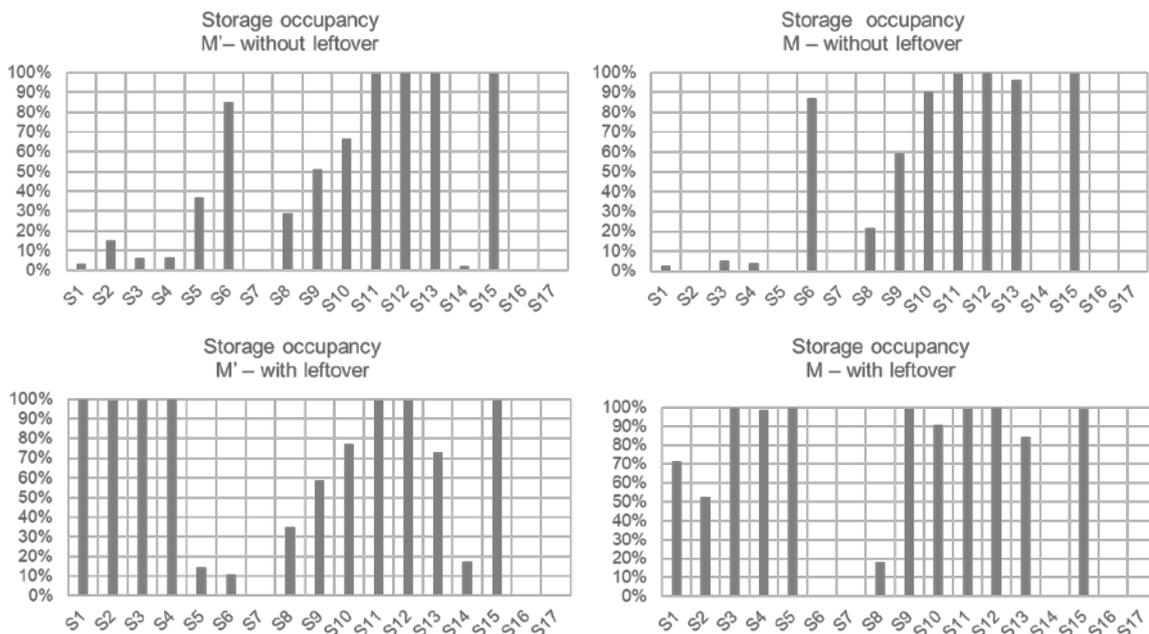
trenes entre los muelles y las áreas de almacenamiento no parece tan interesante como hacerlo con los trenes entre las áreas de almacenamiento y las estaciones de trabajo. También vale la pena mencionar que, aunque la mejor configuración (8/4 con M) logra una reducción del 30,80% en el tiempo total de transporte, otras configuraciones consiguen mejorar esta configuración solo 1 o 2% por encima de la mejor. En concreto, para todas las configuraciones, los resultados producidos por M' están solo ligeramente por debajo de los producidos por M y fueron considerados insignificantes en comparación con las posibles perturbaciones que los cambios asociados podrían causar en las actividades de recepción al cambiar los muelles de descarga asignados actualmente a los proveedores. Finalmente, los trenes que actualmente realizan el transporte entre las áreas de almacenamiento y los puntos de demanda pueden transportar 4 soportes en dos plataformas o más, la alternativa (2/4) no requeriría ninguna inversión en equipos de manejo de materiales. De hecho, se observa que, aunque la política oficial de transporte entre las SA y las AD es de 2 soportes, ya utilizan trenes de 4 soportes de vez en cuando.

En cuanto a las configuraciones con *leftover*, hay que tener cuenta que, solo los trenes más grandes (16 soportes) se han considerado para el transporte hasta los *leftovers*. Su uso aporta una reducción del 21,70% con respecto al caso base que utilizan actualmente, y eso a pesar de la necesidad de una flota adicional de trenes más pequeños o carretillas elevadoras para entregar las piezas a las estaciones de trabajo. El Modelo M' contribuye, con respecto a las asignaciones actuales, a reducciones adicionales en el tiempo total que van desde 3,8 hasta 5,70%, mientras que, de nuevo, M solo mejora los resultados de M' en una fracción de porcentaje. También se pueden lograr mejoras leves al aumentar el tamaño de los trenes que merecen los muelles a las áreas de almacenamiento y aquellos que entregan las estaciones de trabajo. De hecho, la mejora más alta se eleva hasta un 33% para la configuración (8/16/4).

La Tabla 33 muestra un potencial de mejora en la logística de la planta cambiando el modelo logístico. Parece que ese potencial está limitado de alguna manera en torno al 33% y, lo que es más importante, que varias estrategias complementarias pueden ayudar a lograr tal mejora. Para comprender mejor esta observación, la Figura 13. Ocupación de los almacenes en las diferentes configuraciones consideradas. ilustra la tasa de ocupación de las áreas de almacenamiento producidas por los modelos M' y M con (parte superior) y sin *leftover* (parte inferior). En primer lugar, la Figura 13 confirma que, cuando no se permiten los *leftovers*, el uso de áreas de almacenamiento es muy similar para M' y M. Sin embargo, cuando

se permiten los *leftovers*, la utilización del almacenamiento es muy diferente. De hecho, cuando no se permiten los *leftovers*, los modelos M' y M tienden a usar SA que están más cerca de los puntos de demanda, ya que estas distancias son mayores en la planta. Por otro lado, cuando se permiten los *leftovers* y, por lo tanto, el tiempo de transporte para un soporte se reduce mediante el uso de trenes de mayor capacidad, los modelos tienden a asignar partes lo más cerca posible a los muelles de recepción (S1 a S5), ya que este movimiento todavía se realiza mediante carretillas elevadoras transportando 2 plataformas a la vez.

Figura 13. Ocupación de los almacenes en las diferentes configuraciones consideradas.



Fuente: Elaboración propia.

Para resumir, los experimentos numéricos confirman que vale la pena reconsiderar las asignaciones actuales de las piezas a las áreas de almacenamiento, así como el uso de trenes de mayor capacidad. En la mejor alternativa, los ahorros podrían alcanzar hasta el 33% del tiempo logístico. Otros escenarios también ofrecen ahorros muy interesantes, por lo que la elección final debe hacerse con cuidado y teniendo en cuenta que el modelo presentado es una simplificación de la logística real en la planta.

Por ejemplo, el modelo actual considera un tiempo de entrega fijo desde los *leftovers* a las estaciones de trabajo, sin tener en cuenta la ruta de entrega o la ubicación real de las estaciones de trabajo a entregar. Además, el ancho de los pasillos de la planta permite que trenes de 2 soportes ejecuten giros en U dentro de los pasillos, para que los trenes puedan regresar a las SA tan pronto como

descarguen los materiales. Los trenes de mayor capacidad, con 4 soportes y más, deben hacer distancias más largas para completar sus viajes por los pasillos de la planta. Por lo tanto, debería ser necesario evaluar cómo los cambios propuestos en el sistema logístico podrían afectar los requisitos de espacio y las actividades en los puntos de demanda, como la congestión en los pasillos de la línea de ensamblaje adyacentes. Las herramientas de simulación parecen adecuarse a este propósito.

6.8 Conclusión

Este capítulo analiza los flujos de logística que alimentan las estaciones de trabajo de diferentes líneas de montaje en una fábrica de automóviles, donde las piezas y componentes se suministran desde proveedores externos. El flujo logístico diario total alcanza hasta 4.500 unidades de carga por día. El manejo de un volumen tan importante de piezas requiere un uso eficaz de los recursos de la planta.

Se propone un modelo matemático para apoyar a los gerentes de planta en el rediseño de la logística. En particular, el modelo decide la asignación de proveedores a los muelles de recepción, la asignación de las partes recibidas a las áreas de almacenamiento, así como el modo de suministro en cada etapa de suministro de tal manera que el tiempo total requerido para manejar la demanda diaria de la planta se minimice.

Los resultados numéricos producidos para la planta estudiada muestran que el aumento de la capacidad del equipo de manejo de materiales podría llevar a reducciones de hasta el 20% en el tiempo total de distribución. Además, se podrían lograr ahorros adicionales de casi el 10% en el tiempo total de distribución mediante una mejor asignación de proveedores a los muelles de recepción y partes a las áreas de almacenamiento. Aparte de estos resultados, se cree que el modelo constituye una herramienta muy útil para los gerentes de logística, ya que permite evaluar diferentes escenarios estratégicos y anticipar su impacto en el rendimiento del sistema.

El modelo propuesto tiene algunas limitaciones. Primero, como modelo orientado a la estrategia, asume que los recursos están siempre disponibles y no precisa, por ejemplo, el orden en que se realizan las actividades. El modelo no tiene en cuenta la congestión del tráfico, las urgencias y las averías que afectan a las operaciones en el día a día. Dicho esto, se cree que puede ser muy útil para los gerentes que discuten escenarios o estrategias específicas en un proceso de rediseño de logística.

Destacar que, por la naturaleza de este caso de estudio, no fue necesario aplicar la metodología de gestión de riesgos. En primer lugar, se trataba de un caso estratégico donde no se llegaba al nivel de detalle de qué ocurría en cada pasillo o cruce. Además, dentro de la visión estratégica no se buscaba el diseño de la topología de los pasillos, sino la gestión del transporte. Esta planta, al ser mono modelo de un modelo de automóvil pequeño y con poca producción diaria, cuenta con mucho menor volumen de movimientos de entregas junto a la línea. Lo que preocupaba a los gerentes era hacer un uso eficiente de los recursos.

En cuanto a la seguridad, durante este proyecto se aprendió que las condiciones meteorológicas también influyen en el diseño del suministro. En este caso, la planta trabaja en condiciones meteorológicas extremas durante invierno (-30º) y verano (+40º). Todos los pasillos de circulación externos a la planta se encuentran cubiertos para proteger a los trabajadores y con diversas puertas de acceso para evitar cambios bruscos de temperatura. Pese a estar cubiertas, las condiciones de los trabajadores se deben considerar, ya que no se asegura unas temperaturas de trabajo de confort.

7 CASO DE ESTUDIO 2

7.1 Introducción

En este capítulo se presenta un caso de estudio sobre el aprovisionamiento a líneas de montaje con mezcla de modelos. La planta en cuestión requiere de más de 14,000 entregas diarias de material a línea utilizando diversas políticas de suministro.

Ante tal cantidad de movimientos y la posible existencia de tráfico en las inmediaciones de las líneas, se va a realizar una evaluación del flujo de materiales existente. Esta evaluación se hará utilizando la propuesta de metodología de evaluación cuantitativa y cualitativa propuesta en el capítulo 5.

El resto del capítulo se estructura como sigue. En primer lugar, se presenta el caso de estudio y la propuesta de trabajo a realizar sobre él. Después se presenta cada una de las fases de la metodología aplicadas a este caso en cuestión. Finalmente se discuten los resultados de la simulación y del cuestionario.

7.2 Descripción de la situación actual del suministro de material a una planta de montaje multimodelo

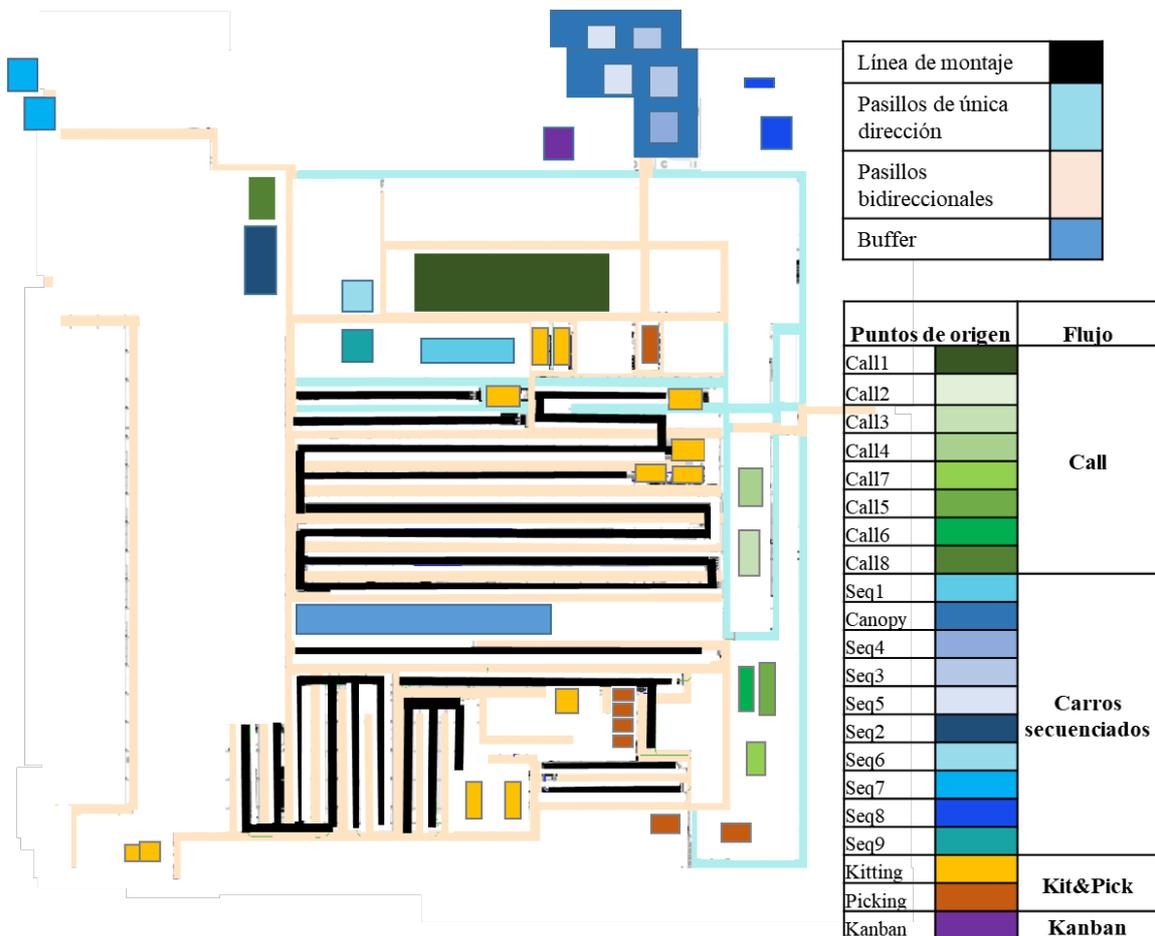
El caso de estudio corresponde con una planta de montaje de automóviles que tiene previsto experimentar un aumento de su producción diaria para alcanzar los 2,100 vehículos ensamblados diariamente de cinco modelos diferentes de elevada complejidad⁵. La planta cuenta con dos líneas de montaje en paralelo con tres secciones consecutivas conocidas como *trim* (interior del vehículo), *decking* (motor) y *chasis* (exteriores) conectadas entre sí mediante almacenes intermedios que pueden permitir la resecuenciación. Las líneas se dividen en estaciones de trabajo, donde se realizan distintos subconjuntos de operaciones y se ensamblan los elementos. El *layout* completo de la planta se puede ver en la Figura 14.

Los componentes y los subconjuntos se colocan a un lado de la línea, cada uno en su punto de consumo (POF), donde los trabajadores o robots los escogen y los ensamblan en los vehículos. Algunos de estos componentes y subconjuntos se entregan mediante transportadores aéreos, pero no se consideran en este estudio ya que no afectan a los flujos de suministro terrestre. El resto de componentes se entregan mediante carretillas remolcadoras utilizando diferentes políticas de

⁵ A lo largo del capítulo se utiliza la nomenclatura de la empresa en cuestión para hacer referencia a las diferentes secciones de la planta y las políticas de suministro.

suministro según el tipo de pieza. Dependiendo del tipo de política de suministro, los componentes se entregarán desde los diferentes almacenes próximos a la línea, desde plantas de montaje previas, como puede ser el caso de los motores, desde puntos de entrega en secuencia o supermercados para entregas kanban entre otros.

Figura 14. *Layout* de la planta de montaje.



Fuente: Elaboración propia.

A la gerencia de la planta le preocupa la cantidad de movimientos que generará el suministro en la planta e inmediaciones. Para ello, se han analizado todos los componentes y subconjuntos a entregar. En total, se han diferenciado cinco tipos de flujos de materiales con los que trabaja la empresa (*call*, kanban, secuenciado, *kitting* y el flujo parásito). La nomenclatura utilizada corresponde con la de la empresa, sin embargo, más adelante se relacionan estas con las descritas en la literatura en el Capítulo 2. El resumen del análisis se puede ver en la Tabla 34.

El flujo *call* corresponde con los productos almacenados junto a la línea en cada punto de consumo (política de almacenamiento en línea). Estas entregas se realizan mediante carretillas remolcadoras con capacidad de un soporte. Cada referencia

cuenta con un punto de pedido y un consumo de piezas por vehículo que pasa por la línea, luego se puede estimar estáticamente qué cantidad de entregas se generarán diariamente.

El flujo kanban cuenta con doce rutas donde la mayoría tiene una periodicidad de 1 hora, pero, dependiendo de los productos, su frecuencia puede variar de una por hora a una por turno (política kanban). Un vehículo habitual mide unos 14 m de largo, cada parada dura varios minutos, y el conductor del camión tiene que bajar en cada estación donde el vehículo entrega productos. Dado que la ruta de entrega es circular, el ciclo de retorno en este tipo de flujo se incrusta en la ruta.

Los carros secuenciados entregan varios subconjuntos multirreferencia de gran tamaño en secuencia (política de piezas secuenciadas). La capacidad de los carros puede oscilar entre 3 y 75 subconjuntos en función del tamaño del soporte y las dimensiones del subconjunto. En este caso los proveedores externos realizan la mayor parte de esta actividad, pero en algunos casos el proceso se ha internalizado para trabajadores de la empresa OEM.

Cuando los carros están llenos (o cuando se solicitan por cualquier otro motivo), una carretilla remolcadora los transporta desde la célula de secuenciado. Dependiendo de la política de entrega de la planta, las carretillas pueden remolcar entre uno y cuatro carros secuenciados en una entrega directa múltiple. El conductor realiza una ruta para minimizar la distancia y esta requiere de varias paradas. Los carros vacíos en la línea de ensamblaje, los que ya se están utilizando, deben volver al punto de origen dentro de la ruta de entrega y retorno.

La planta cuenta con 15 células de *kitting* y *picking* distribuidas junto a las líneas (política *kitting*). En las células de *kitting*, el punto de entrega del kit se encuentra al principio de la línea, aunque el consumo real del producto podría estar en una estación diferente. El kit se mueve con automóvil hasta el final de la línea, y tiene que regresar cuando está vacío. En el flujo *picking*, los diferentes elementos se colocan en contenedores y se entregan en lotes a su punto de consumo, que corresponde con el punto de entrega de los contenedores. En este caso durante el viaje (de ida y vuelta) lleva cajas vacías.

Modelos y métodos para el análisis, diseño y evaluación de la logística interna de aprovisionamiento a líneas de montaje con mezcla de modelos en fabricación de automóviles

Tabla 30. Resumen de los diferentes flujos de materiales y políticas de suministro a las líneas de montaje.

Flujo	Política de suministro	Política de entrega	Elementos de manutención	N.º de referencias	Punto de pedido	Revisión periódica (h)	N.º de puntos de origen	Capacidad de los contenedores	Consumo de piezas por vehículo	N.º de entregas diarias
Call	Almacenamiento en línea	Envío directo simple	Carretilla remolcadora (TT)	+400	3 - 125	-	8	30 -1,500 ud	1 - 2,223	+1,000
Kanban	Kanban	Ruta <i>milk-run</i>	Carro	+1,400	-	1-4	4	25 -100,000 ud	1 - 13,870	+ 225
Carros secuenciados	Secuenciado	Envío directo múltiple (1-4)	Carro	+200	-	JIS	10	3 - 75 ud	1 - 2	+12,000
Kitting y picking	Kitting	Ruta	Carro		-	JIS	18	12 - 50 kits	1	+300
		-	Conveyor	+400	-	JIS	9	1 kit	1	9 * 2,100
Parásito			Carro	-	-	JIS	4	12 - 50 ud	1 - 2	+500

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se ha considerado un flujo denominado 'parásito', que incluye el resto de movimientos de material a lo largo de planta que no supone un volumen significativo como para ser considerado como un flujo independiente. En este grupo se incluye el movimiento de unidades vacías y complementos como el retorno de los patines sobre los que van colocados los vehículos en la línea y que se devuelven al inicio de esta cuando termina el ensamblaje, la entrega de motores y subconjuntos de transmisión desde otra planta de montaje hasta la línea de montaje final, los protectores de las puertas durante todo el proceso de montaje, e incluso el retorno de cartón y plástico generado en las estaciones. También forma parte de este flujo el denominado por el fabricante como *refilling*, un suministro de tipo kanban en el que periódicamente se reponen unas posiciones de referencias de tamaño grande como pueden ser las gomas.

Hay que tener en cuenta que cualquiera de las células utilizadas para las actividades de preparación de pedidos de la línea debe incluir los elementos necesarios para realizar la actividad. Por lo tanto, se tienen entregas *call*, entregas kanban e incluso carros secuenciados que alimentan otras estaciones que, a su vez, llenan líneas. A modo de ejemplo, las puertas se montan en una línea separada y se entregan en un transportador aéreo. Las líneas de las puertas se alimentan con flujos *call*, kanban, carros secuenciados y elementos de *kitting*. Algunas de las células de *kitting* para esta línea se alimentan a su vez con *call* y kanban, incluso los espejos retrovisores se ensamblan en una estación separada y se envían a la célula del *kitting*.

No solo las unidades mecanizadas se mueven a lo largo de las plantas. Un problema altamente relevante surge debido al movimiento de los trabajadores, de los cuales los más significativos son los movimientos que se producen durante los cambios de turno y las pausas, momento en el que aparece un flujo de peatones y los elementos de manutención deberían ceder su paso.

Finalmente, hay que prestar atención a lo que generalmente se considera el flujo más relevante en las plantas de ensamblaje, el flujo de automóviles. Las unidades vienen del taller de pintura donde se secuencian y se mueven en diferentes tipos de transportadores (terrestres y aéreos). Si son terrestres, pueden interferir, o no, con otros tipos de flujo. Si interfieren, esto debe ser considerado al diseñar la red de transporte interno.

Se puede afirmar que los caminos seguidos por los automóviles apenas se modifican durante la vida útil de la instalación. Los caminos disponibles para carretillas y peatones son mucho más fáciles de cambiar.

7.3 Fase 1: preliminar

7.3.1 Identificación del problema y del objetivo

Tal y como se ha presentado el caso de estudio en el apartado anterior, la planta de montaje en cuestión alberga una gran cantidad de movimientos cada día, por lo que se plantea realizar una evaluación de la logística de aprovisionamiento a la línea. El objetivo es conocer qué ocurrirá en los pasillos adyacentes a la línea, si existirá tráfico y cómo se definiría la seguridad del entorno actual, y de acuerdo a los resultados del análisis, explorar alternativas de diseño. Para evaluar el flujo de material durante la entrega a las líneas, y de acuerdo a lo propuesto en el capítulo 5, se propone analizar el flujo de material cuantitativa y cualitativamente.

Para la evaluación cuantitativa se propone el uso de la simulación, que tal y como se ha visto en el capítulo 4, es una herramienta potente que permite evaluar la dinámica de los sistemas de producción. En este caso, será de gran utilidad para conocer qué ocurre en cada instante en los pasillos de la planta, y poder proponer medidas en el caso de encontrar accesos o pasillos saturados. Además, esta herramienta permite el uso de elementos *andon* para visualizar medibles durante la simulación y facilitar el análisis.

7.3.2 Recogida de datos

La recogida de datos ha sido el plano de la planta mostrado en la Figura 14, los diferentes flujos (ver Tabla 34) con las entregas diarias y el consumo por automóvil en la línea de montaje.

También se han recogido otros datos de la planta como la producción diaria, los turnos de trabajo, tiempos de descanso, tiempos de operación de los elementos de mantenimiento, etc. Estos datos se presentan más adelante en el apartado de experimentación del modelo de simulación.

7.3.3 Identificación de los flujos y cuantificación estática de estos

Estos datos se encuentran en la Tabla 32 junto a la descripción de la situación actual.

7.4 Fase 3: Estimación cuantitativa

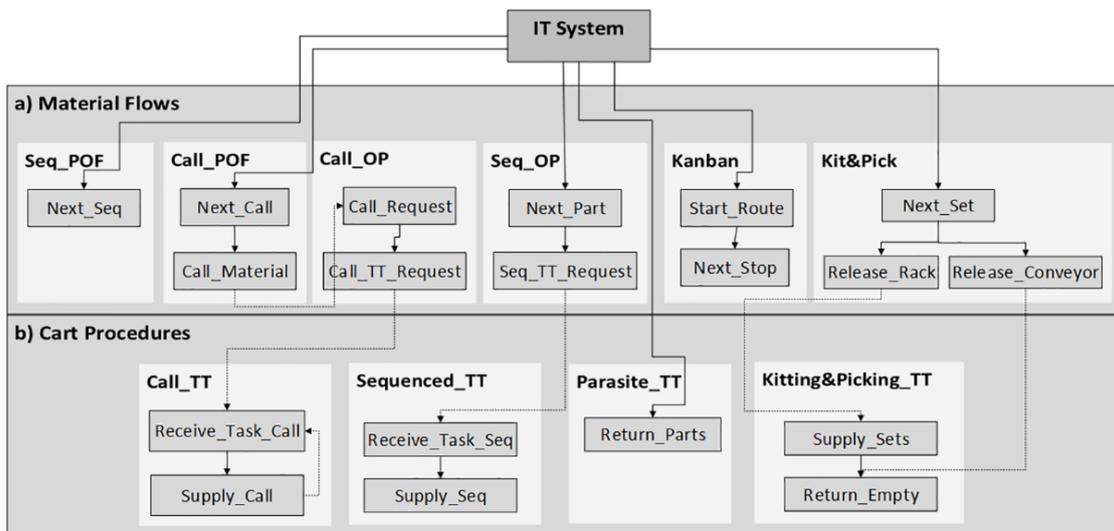
7.4.1 Modelar alternativa/as en software de simulación por eventos discretos

A la hora de modelar la complejidad y el comportamiento dinámico de los sistemas de suministro a líneas de montaje con mezcla de modelos, es interesante separar el modelo de simulación en capas (red, lógica, visual y base de datos) (Saez-Mas, Garcia-Sabater, y Morant-Llorca, 2018).

Con este enfoque, se espera lograr algunas ventajas con respecto a un modelo de simulación convencional, como la adquisición de un modelo de simulación que represente fielmente la realidad, al desacoplar los flujos de información de los flujos de materiales. Además, tiene otras ventajas como que se puede realizar cambios y experimentar con una capa sin que interfiera con otras. El software DES utilizado ha sido SIMIO®.

La capa de red es común a todos los flujos y está compuesta de elementos simples, como conexiones de red, pasillos, líneas de montaje de puertas y líneas de montaje de vehículos. A los elementos compuestos, como los puntos de origen (OP), puntos de consumo de piezas (POF), células montaje o flotas elementos de mantenimiento, se les ha proporcionado inteligencia lógica. Por ejemplo, cada POF consume parte del stock disponible en línea y se basa en la secuencia de líneas para ello.

Figura 15. Relación de los procesos de la capa lógica del modelo de simulación.



Fuente: Elaboración propia.

La lógica de simulación se ha modelado como un sistema de gestión de almacenes autónomo. La Figura 15 incluye el procedimiento lógico para cada sección de punto de consumo, punto de origen y elemento de mantenimiento identificada en el sistema. Como se puede ver, todas las secciones están interrelacionadas a través de la información y el flujo de material.

El procedimiento Next_Seq en la sección Seq_POF representa el consumo de piezas en secuencia en cada punto de consumo siguiendo una secuencia de montaje. El procedimiento Next_Call en la sección Call_POF consume las partes *call*. Cuando la cantidad llega al punto de pedido, los trabajadores solicitan material al almacén, Call_Material.

Para los diferentes puntos de origen de las partes *call*, el procedimiento Call_Request recibe el pedido de POF, una carretilla elevadora recoge el palé del almacén y lo libera en la zona de selección. Cuando está allí, el procedimiento Call_TT_Request solicita una carretilla remolcadora, que recibe la tarea, Receive_Task_Call, va a la zona de selección y toma el palé. Luego, el procedimiento Supply_Call realiza el suministro desde la zona de selección del almacén hasta el punto de consumo y luego regresa con el vacío.

De la misma manera los proveedores secuencian los carros en los puntos de origen de secuenciación. Una vez que el tiempo para consumir la primera parte del carro es igual al tiempo de transporte estimado, o el carro está lleno, se solicita una carretilla remolcadora, Seq_TT_Request. En este caso, una carretilla remolcadora recibe la tarea, Receive_Task_Seq, y puede remolcar más de un carro por envío si hay tiempo suficiente para el transporte.

Las células de *picking* y *kitting* reciben el siguiente kit para preparar Next_Set desde el sistema de información; los trabajadores dejan el kit en la cinta transportadora, Release_Conveyor, o en un palé, Release_Pallet. En el último caso, la flota remolcadora *picking* y *kitting* va a la célula y transporta los kits al punto de entrega inicial, Supply_Sets. Luego va al final de la línea, toma el palé con los kits vacíos y regresa a la célula de origen, Return_Empty. Al igual que con el parásito una carretilla remolcadora en la sección Parasite_TT, un transporte definido entre dos puntos entrega motores, protectores o patines, Return_Parts. El último flujo, las rutas kanban, recibe periódicamente el pedido para iniciar la ruta desde el sistema de información, Start_Route, y sigue la secuencia de la ruta hasta el final, cuando regresa a su punto de inicio.

La capa de la base de datos incluye todos los datos involucrados en la última sección necesaria para mover a las carretillas, como puntos de origen, puntos de consumo, puntos de reordenación o secuencias de líneas. La base de datos fue externalizada desde el software de simulación usando MySQL.

Finalmente, el modelo de simulación proporciona aspectos reales para facilitar la conexión entre los usuarios y los clientes (ver Figura 16). El modelo incluye elementos de *andon* para mostrar dinámicamente los medibles propuestos y se presentan más adelante.

7.4.2 Definir medibles del tráfico necesarios

Los medibles a utilizar se han seleccionado del capítulo 5 y la intensidad, volumen y congestión se encuentran también recogidos en el manual HCM (Board 2010) y se presentan en la Tabla 35. Medibles propuestos para la evaluación cuantitativa del flujo de material. Esta tabla, además de medibles sobre el tráfico en planta, también revisará la eficiencia del transporte de los elementos de manutención actuales. El objetivo es poder proponer mejoras en la capacidad del transporte y la ubicación de los puntos de origen de las referencias.

Tabla 31. Medibles propuestos para la evaluación cuantitativa del flujo de material.

Medible	Unidad	Descripción
Número de entregas	1. Entregas / hora	Número de piezas entregadas para cada flujo durante un periodo de tiempo de 1 hora.
	2. Entregas / hora	Número de piezas entregadas en cada punto de origen (OP) durante un lapso de tiempo de 1 hora.
Distancia recorrida	3. Metros / día	Metros recorridos para cada flujo durante un periodo de tiempo de 1 día.
	4. Metros / día	Metros recorridos por OP durante un periodo de tiempo de 1 hora.
Intensidad	5. Vehículos / hora	Movimientos por pasillo, intersección y puntos de cruce durante un periodo de tiempo de 1 hora.
Volumen	6. Vehículos / día	Movimientos por pasillo, intersección y puntos de cruce durante un periodo de tiempo de 1 día.
Congestión	7. Vehículos / pasillo o acceso (min, max, media)	Número de vehículos que viajan por pasillo o sección por flujo durante un periodo de tiempo determinado.

Fuente: Elaboración propia.

De la simulación se espera obtener información acerca de cada punto de origen. El objetivo de esto es poder estudiar cada uno por separado y poder proponer alternativas de localización de acuerdo al tráfico que generen en la planta. De ellos se obtendrán los metros recorridos y la cantidad de entregas realizadas.

Por otra parte, debido al volumen de carros secuenciados a entregar diariamente en la planta, 12.000, se van a establecer diferentes alternativas en cuanto a la política de entrega. Se va a experimentar con carros que envían 1, 2, 3 o 4 plataformas simultáneamente. El propio simulador busca el camino más corto para entregar el producto en la línea.

7.4.3 Identificar zonas a evaluar

Para cada uno de los flujos se ha considerado la cantidad de movimientos diarios que generan. Las referencias *call* dependerán del consumo por vehículo de cada pieza y de la capacidad del contenedor. En el caso de los carros secuenciados, los movimientos se han definido por la capacidad del carro y por el consumo de la línea.

El flujo de *kitting* y *picking*, consumen un kit por vehículo ensamblado, por lo que la cantidad de movimientos que generen dependerá de la producción y de la capacidad de los elementos de manutención para transportar los kits. Los horarios de las rutas kanban también se han previamente definidas. Los tiempos de carga y descarga se han definido en 90 segundos para cada parada realizada. La velocidad de los elementos de manutención es de 4,5 metros por segundo.

Los accesos a la planta también se evaluarán. Como se ha dicho anteriormente, las carretillas deciden en la simulación tomar el recorrido más corto para realizar las entregas. Sin embargo, si se diera el caso de accesos saturados, sería recomendable estudiar alternativas de accesos o forzar el uso de algunos puntos de origen de determinados accesos para equilibrar el volumen.

Por otra parte, en cada uno de los pasillos de la línea se evaluará la congestión en cada momento del día. En los cruces e intersecciones entre pasillos se medirá la intensidad del tráfico. Con estos medibles se espera detectar aquellos puntos que se considerarán críticos y motivo de un estudio cualitativo.

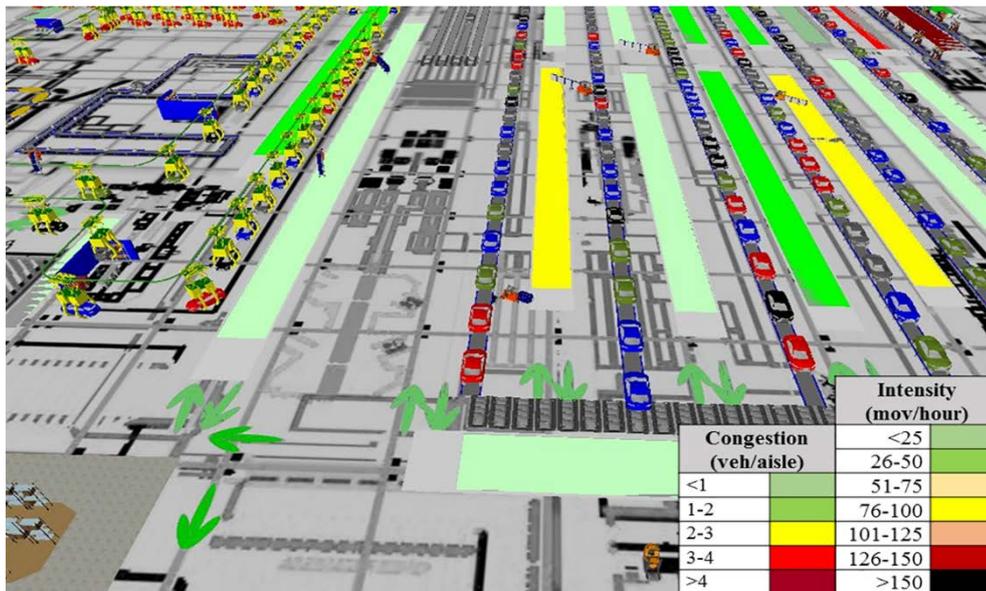
7.4.4 Incluir elementos *andon* en el modelo y realizar la experimentación

El modelo de simulación en capas, permite la representación del sistema de suministro, y, además, se le han incorporado elementos *andon* que mediante colores tal y como muestra la Figura 16. Hay barras en cada pasillo, que representan

la congestión durante cada hora de simulación, denotadas por colores de barra, y la intensidad en los cruces se muestra con flechas coloreadas.

El modelo se ha simulado durante 24 horas de producción para considerar los tres turnos de trabajo de la planta. Además, el movimiento de los trabajadores durante los cambios de turno también se ha reflejado en el modelo. La simulación comienza con un llenado aleatorio de stock para cada una de las referencias.

Figura 16. Capa visual. Vídeo [link](#).



Fuente: Elaboración propia.

7.5 Fase 4: Estimación cualitativa

7.5.1 Recorrer la planta, Seleccionar zonas de muestra y Recoger datos de las zonas de muestra

Durante esta fase, se recorrió la planta completa y se identificó que el principal problema se encontraba en los accesos a las plantas y en los pasillos de la zona de las líneas de montaje denominadas 'trim', en las que se montan el interior de los vehículos.

Para la recogida de datos se tomaron nota del diseño de los carriles y qué tipo de vehículos circulan entre otros. Estos datos se anotaron junto a cada pregunta del cuestionario de diversos accesos y pasillos revisados, para su posterior uso en el cuestionario.

7.5.2 Aplicar el cuestionario de la herramienta de auditoria

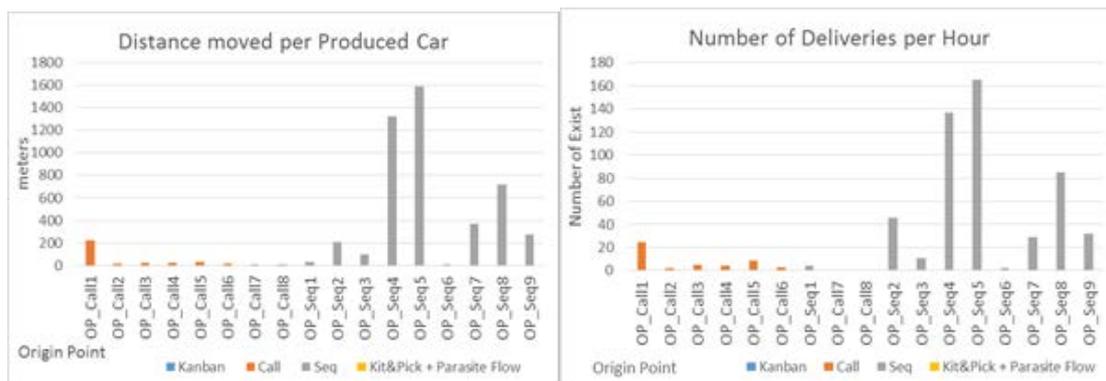
Con la información recogida durante las tareas anteriores se completó finalmente el cuestionario cualitativo. Los resultados se encuentran descritos en el apartado 12.2 del capítulo 12 de anexos.

7.6 Fase 5: Evaluación

7.6.1 Evaluar los resultados de la estimación cuantitativa

Los resultados de la simulación muestran, como se estimó en la descripción del caso, que los carros secuenciados tienen una influencia mayor en la planta (ver Figura 17). Los puntos de origen que experimentan una mayor carga de trabajo en cuanto a entregas corresponden con los carros secuenciados.

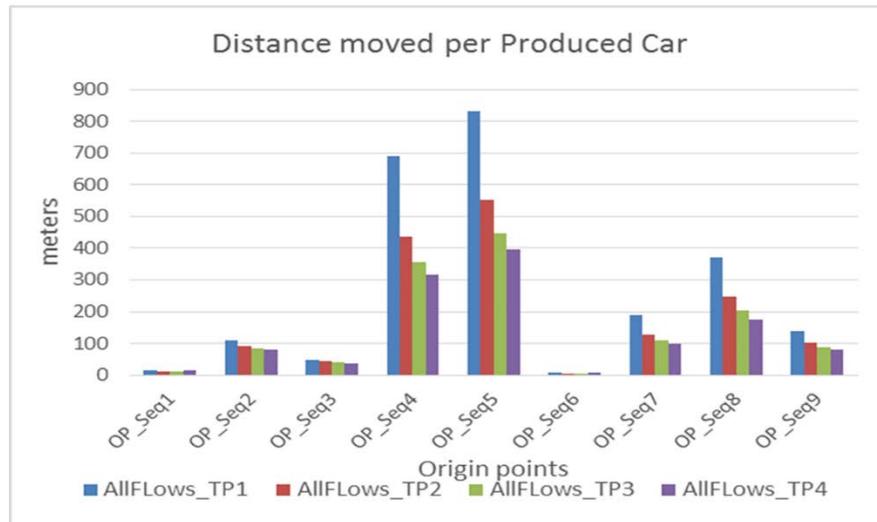
Figura 17. Distancia recorrida por hora y vehículo producido desde los puntos de origen, y número de entregas por hora y vehículo producido desde los puntos de origen.



Fuente: Elaboración propia.

En la primera fase de experimentación, la política de suministro para el carro secuenciado fue de uno por entrega. Con el enfoque de simulación en capas, fue posible realizar numerosos experimentos en los que se modificaba la política de suministro de uno, dos, tres y cuatro carros por entrega para el flujo de secuenciación. La Figura 18 muestra cómo esta política afecta a los metros recorridos y que aumentando la cantidad de carros por viaje se consigue ser más eficiente en el suministro. Además, tal y como muestra la Figura 14, estos puntos de origen son los más alejados respecto de la línea de montaje, luego representan la mayor parte de los metros recorridos por las flotas de carretilleros de la planta.

Figura 18. Distancia recorrida en metros por vehículo producido en la línea por hora y política de suministro de carros secuenciados (1, 2, 3 o 4 carros por viaje).



Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 36 muestra las carretillas que acceden al cabo de 24h de simulación a la planta por cada uno de los accesos. Esta revisión de entrada / salida ayuda a encontrar entradas colapsadas. Un gran volumen de movimientos pertenece a los vacíos. Por ejemplo, el acceso 1 alberga alrededor de 10 carretillas por minuto luego se debería revisar que las instalaciones son seguras y fiables de satisfacer estas necesidades.

Tabla 32. Volumen de carretillas que acceden diariamente a la planta por cada uno de los accesos.

Acceso	Entrada	Salida
1	6.129	9.865
2	1.741	751
3	4.603	29
4	-	1.434
5	-	342
Total	12.473	12.421

Fuente: Elaboración propia.

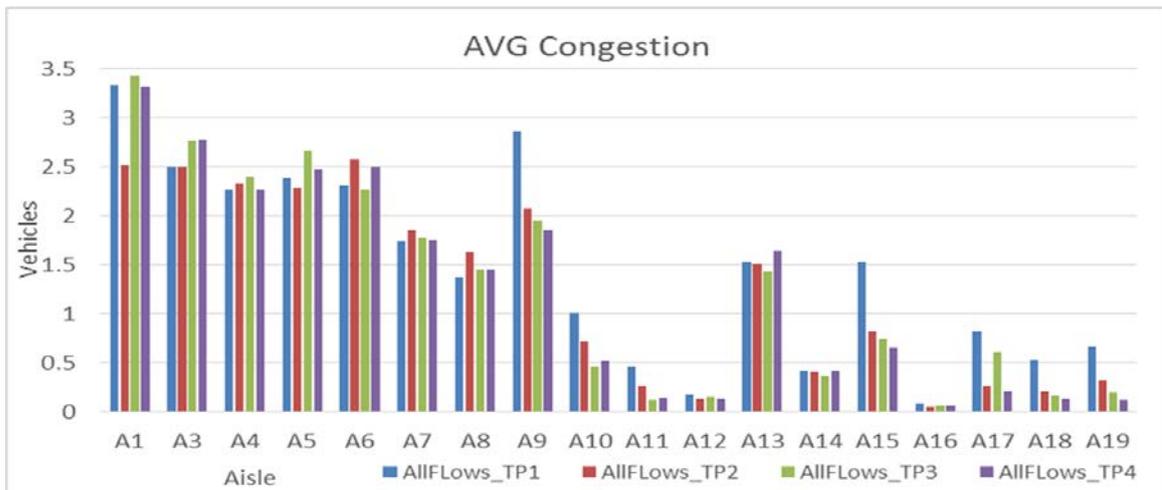
Los resultados de la congestión en cada pasillo muestran que, en promedio, hay permanentemente dos vehículos por pasillo (ver Figura 19). Además, el valor máximo observado fue de 14 vehículos por pasillo (ver Figura 20). Los primeros resultados de la simulación confirman que los problemas de tráfico en plantas de

montaje complejas son una realidad. En las Figura 21 y Figura 22 se puede ver la congestión en los pasillos originada por cada uno de los flujos de materiales.

Los resultados anteriores destacan que las políticas de los secuenciados de aumentar la capacidad logra reducir el número de metros recorridos, entregas por punto de origen, sin embargo, según la Figura 19 y la Figura 20 siguen circulando dos o tres elementos de manutención por minuto. Hay que destacar que estos pasillos son bidireccionales, tienen pasos de peatones y conectan con entradas, salidas, cruces, giros, secciones bidireccionales o pasos de peatones, lo que supone una mayor en el entorno.

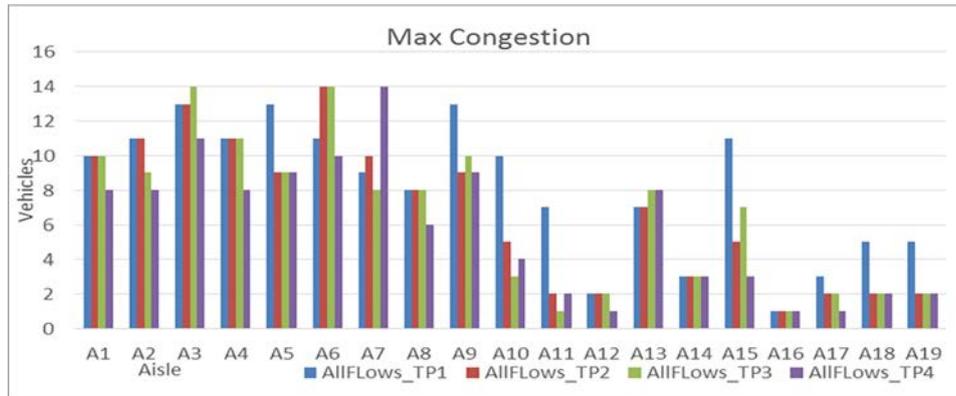
La congestión promedio a lo largo de los pasillos sigue teniendo los mismos valores (ver Figura 19 y la Figura 21). La política de los secuenciados no mejora la congestión porque los carros pasan más tiempo en los pasillos debido a su volumen y longitud. Además, conducir se vuelve más difícil que antes y genera colas, lo que podría considerarse un cuello de botella en el suministro

Figura 19. Congestión media por pasillo adyacente a la línea de montaje para cada política de suministro secuenciado de 1, 2, 3 o 4 carros por viaje.



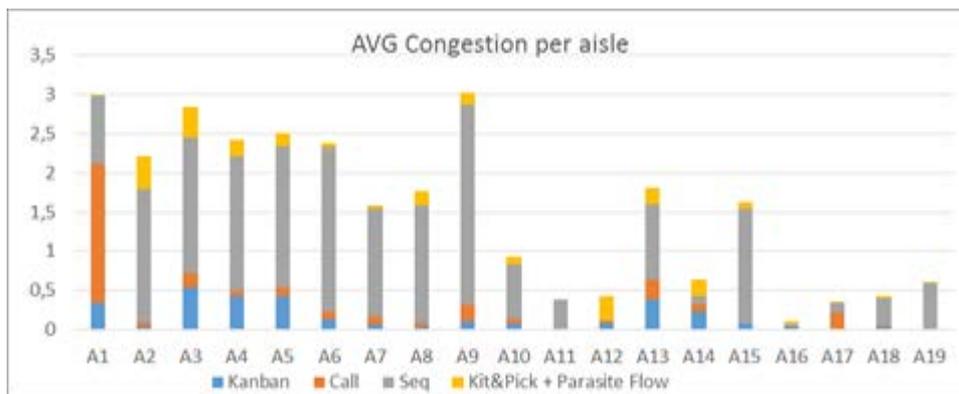
Fuente: Elaboración propia.

Figura 20. Congestión máxima por pasillo de la línea de montaje para cada política de suministro secuenciado de 1, 2, 3 o 4 carros por viaje.



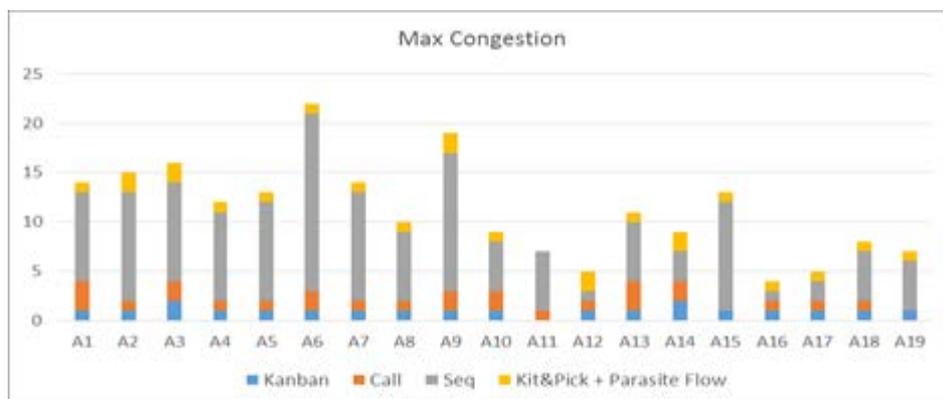
Fuente: Elaboración propia.

Figura 21. Congestión media en cada pasillo generada por los diferentes flujos de materiales.



Fuente: Elaboración propia.

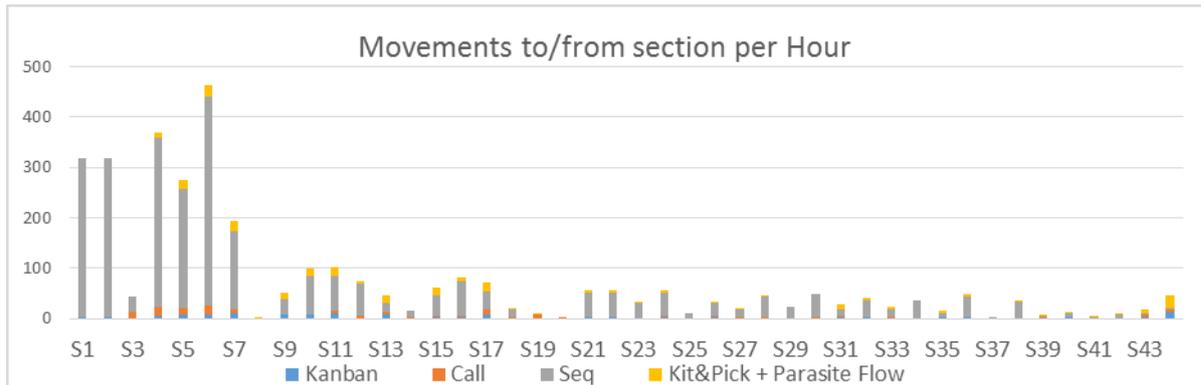
Figura 22. Congestión máxima en cada pasillo generada por los diferentes flujos de materiales.



Fuente: Elaboración propia.

Los tramos de accesos, cruce e intersecciones se han identificado también secciones. La Figura 23 recoge la intensidad media por hora de cada uno de las secciones observadas. La mayoría de estas secciones experimentan entre 10 y 100 movimientos de carretilla por hora. Sin embargo, de las 43 secciones evaluadas con la simulación, destacan 6 de ellas porque su intensidad promedio puede alcanzar los 250-400 movimientos por hora, lo que equivale a 4-8 carretillas por minuto.

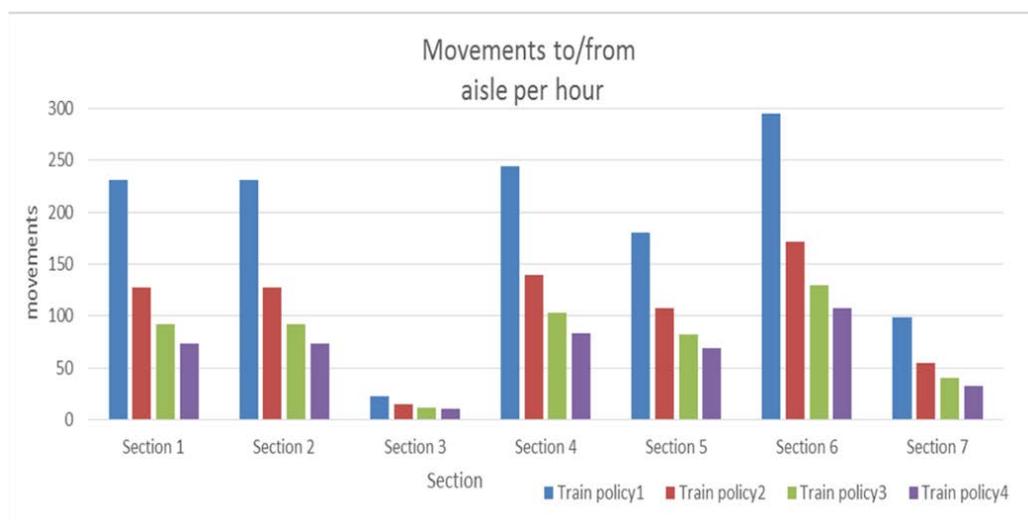
Figura 23. Intensidad media por hora en cada sección evaluada.



Fuente: Elaboración propia.

La Figura 24 muestra el número promedio de movimientos por hora en cada sección crítica evaluada (entradas y salidas desde la planta, e intersecciones) para las diferentes políticas de los carros secuenciados con 1, 2, 3 o 4 carros por entrega. Un gran volumen de estos movimientos con transportes en vacíos.

Figura 24. Comparación de la media de movimientos por hora en las 7 secciones críticas para entregas secuenciadas de 1, 2, 3 o 4 carros por viaje.



Fuente: Elaboración propia.

En general, los resultados de la simulación muestran los aspectos más relevantes del flujo de material en la planta y proporcionan información suficiente para resaltar los puntos de interés en futuras investigaciones y posibles cambios en el diseño y gestión de la planta.

7.6.2 Evaluar resultados de la estimación cualitativa

Tal y como muestra la Figura 14, la topología de los pasillos de la planta está diseñado en torno a las líneas de producción y por pasillos adyacentes a estas. La mayoría de los pasillos son bidireccionales, lo que puede suponer un riesgo en el transporte si el pasillo no es lo suficientemente ancho o hay un flujo considerable que genere colas durante el transporte.

El resultado total del cuestionario ha sido 151/176, donde la gran mayoría de resultados estaban en la opción 3 y 4. Lo verdaderamente relevante es revisar aquellas cuestiones que hayan recibido una valoración de 1 o 2, y tratar de reforzarlas.

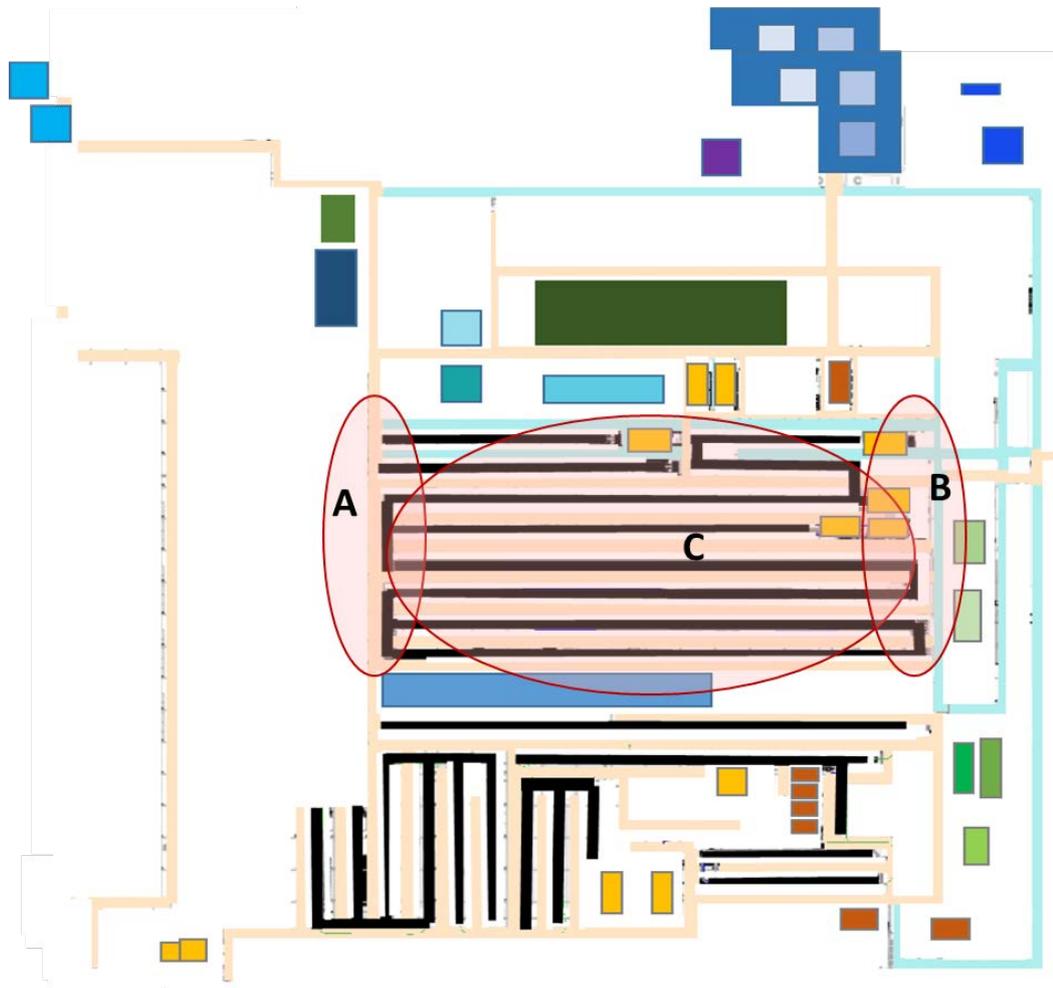
La planta cuenta con medidas de seguridad satisfactorias y un departamento específico encargado de ello. Sin embargo, en el momento del diseño de la planta, esta no fue pensada para albergar el volumen de movimientos calculados anteriormente, ni por sus accesos ni pasillos, luego se deberían evaluar posibles alternativas para equilibrar el uso de los accesos y de los pasillos.

Los principales problemas identificados son la necesidad de ajustar la planta a las condiciones del tráfico actual, como por ejemplo la bidireccionalidad de algunos pasillos con un elevado tránsito, los giros permitidos dentro de un mismo pasillo o la existencia de remolques de gran longitud que pueden entorpecer el tráfico del resto del suministro.

7.6.3 Identificar y documentar puntos críticos

Se han identificado 3 zonas como críticas (Figura 25). Se considera punto crítico a aquella sección que, por sus características, genera una gran cantidad de movimientos, cruces entre diferentes flujos o incluso ambas, y, por consiguiente, pueden suponer un punto de riesgo para el suministro de material.

Figura 25. Zonas seleccionadas como críticas durante la evaluación del tráfico y seguridad.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 33. Tabla resumen del punto crítico A.

Punto crítico A		
Flujo	Medibles	S/mov
Call Picking Secuenciados Kanban	<ul style="list-style-type: none"> - Intensidad: 310 movimientos por hora. - Congestión media: 3 vehículos - Congestión máxima: 19 vehículos 	12 segundos entre movimientos.

Descripción de entorno
<ul style="list-style-type: none"> - Corresponde con el acceso a la planta (sección 6 en las gráficas anteriores) y el pasillo (pasillo 9 en las gráficas anteriores), ubicado a la izquierda-vertical de la Figura 25. - Este pasillo cuenta con un paso de peatones debidamente separado. - Es un pasillo bidireccional y suficientemente ancho. - Los pasillos de la zona de trim (2-8) acceden a este y cuentan con una gran afluencia de vehículos.
Problemas de seguridad
<ul style="list-style-type: none"> - Este pasillo recoge cada hora entre 100 y 300 movimientos según la capacidad seleccionada para los carros secuenciados. - Experimenta una gran congestión (hasta 19 vehículos simultáneamente) originada principalmente por el retorno de los carros secuenciados vacíos. - Experimenta muchos giros para acceder a los pasillos transversales de a zona de trim, denominada como punto crítico C (pasillos 2-8). - Los carros secuenciados pueden remolcar hasta 4 plataformas, lo que incrementa el problema de los giros al ser vehículos largos, obligando a parar al resto de tránsito y esperar, generando congestión. - No hay carriles diferenciados para ambas direcciones de circulación.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 34. Tabla resumen del punto crítico B.

Punto crítico B		
Flujo	Medibles	S/mov
Call Picking Secuenciados Kanban	<ul style="list-style-type: none"> - Intensidad: 460 movimientos por hora. - Congestión media: 3 vehículos - Congestión máxima: 14 vehículos. 	8 segundos entre movimientos.
Descripción de entorno		
<ul style="list-style-type: none"> - La segunda zona (B) corresponde con el pasillo de bajada, vertical y unidireccional (pasillo 1 en las gráficas anteriores) del lado derecho de la Figura 25. - Este pasillo cuenta con un paso de peatones debidamente separado. - Una gran parte de los almacenes de las referencias call se encuentran al otro lado del pasillo. 		

Problemas de seguridad
<ul style="list-style-type: none"> - Este pasillo, pese a ser de una única dirección experimenta un gran volumen de movimientos y congestión originada por los movimientos de las entregas call ubicadas a la derecha de la planta. - Este pasillo cuenta con cientos de cruces de flujos al otro lado del pasillo para entregar o recoger material y otros que se unen al tránsito del pasillo. - Además, todos los carros secuenciados utilizan este pasillo para descender y acceder a cada uno de los pasillos de trim. Estos carros tienen una gran longitud y pueden suponer un riesgo a la hora de realizar los giros mientras continuamente salen entregas de piezas call desde los almacenes contiguos.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 35. Tabla resumen del punto crítico C.

Punto crítico C		
Flujo	Medibles	S/mov
Call Picking Secuenciados Kanban	<ul style="list-style-type: none"> - Congestión media: 2-3 vehículos - Congestión máxima: 12-15 vehículos 	
Descripción de entorno		
<ul style="list-style-type: none"> - La tercera zona (C) representa cada uno de los pasillos de la zona de trim (pasillos 2-8) por los que circulan todos los flujos. - En estos pasillos se realizan paradas para realizar las entregas de suministro. - Los pasillos cuentan con un carril para peatones debidamente separado. También pueden albergar a más de un elemento de mantenimiento siempre que uno de ellos se encuentre debidamente estacionado en uno de los laterales. 		
Problemas de seguridad		
<ul style="list-style-type: none"> - El principal problema es la cantidad de paradas realizadas para suministrar, las cuales generan congestión y pueden ocasionar retrasos para el resto de vehículos si las paradas no se realizan con cuidado para no entorpecer al resto. 		

Fuente: Elaboración propia.

7.7 Fase 6: Discusión de los resultados y propuestas de mejora futuras

7.7.1 Proponer mejoras a la alternativa final para tratar de reducir el tráfico y aumentar la seguridad

Algunas de las medidas propuestas para cada uno de los 3 puntos críticos están recogidas en las siguientes tablas.

Tabla 36. Recomendaciones propuestas para reducir el tráfico y mejorar la seguridad en el punto crítico A.

Punto crítico A
Recomendaciones
<ul style="list-style-type: none">- Separar los carriles de circulación de diferentes direcciones.- Aumentar las medidas de seguridad con señalización para aquellos vehículos que se incorporan a la circulación de este carril para evitar riesgos en los giros.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 37. Recomendaciones propuestas para reducir el tráfico y mejorar la seguridad en el punto crítico B.

Punto crítico B
Recomendaciones
<ul style="list-style-type: none">- Abrir más entradas o ubicar las instalaciones de los carros secuenciados más cercanos de las líneas debido a la cantidad de movimientos y metros recorridos que generan. Esta decisión reduciría la distancia recorrida por elemento de manutención y podría facilitar la gestión de la flota al implementar las entregas múltiples y establecer rutas de reparto. Los resultados de la distancia recorrida permiten estimar la flota de carretillas por punto de origen.- Los carros secuenciados generan un gran tráfico y transporte desde puntos de origen alejados, luego sería interesante reconsiderar una reubicación de este tipo de flujo para mejorar la eficiencia del diseño del flujo de material y del transporte realizado.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 38. Recomendaciones propuestas para reducir el tráfico y mejorar la seguridad en el punto crítico C.

Punto crítico C
Recomendaciones
<ul style="list-style-type: none">- Con respecto a los cambios en las políticas, la dirección de los pasillos podría ser revisada, y se podría considerar algunos pasillos con mucho tránsito como unidireccionales. Las rutas también deben estandarizarse para mejorar la seguridad de los flujos de materiales y equipos en toda la planta. Además, de las secciones consideradas como críticas, conviene evaluar su entorno de trabajo cualitativamente para un mejor análisis.- Hay que destacar que todos los pasillos son bidireccionales y se puede realizar maniobras de cambio de sentido en ellos, lo que puede generar caos añadido al tráfico ya existente. De este modo, se recomendaría estudiar la direccionalidad de los pasillos para intentar, aunque sea hacer de único sentido aquellos que experimenten un mayor tránsito. En este caso, el realizar cambios de sentido no sería necesario, y en el caso de mantener pasillos bidireccionales, obligar a los conductores a llegar hasta el final del pasillo para realizar el cambio en el caso de llevar más de un remolque que pueda generar colas y colapsos durante la operación.

Fuente: Elaboración propia.

7.8 Conclusión

Este capítulo se describe y evalúa un caso de estudio sobre la logística de aprovisionamiento a una línea de montaje con mezcla de modelos. El caso resalta los problemas de tráfico generados por los elementos de mantenimiento en los pasillos de las plantas de montaje.

Para ello se utilizaron medibles propuestos en el capítulo 4 sobre la ingeniería del tráfico para considerar la eficiencia y seguridad de la logística. Los flujos de tráfico se estimaron utilizando simulación por eventos discretos para considerar la dinámica del sistema de montaje, como es la secuencia de montaje o el factor tiempo.

El modelo de simulación adoptó un enfoque novedoso y utilizó código externo que actúa como un Sistema de Gestión de Almacenes. Este modelo contiene diferentes sistemas de suministro y líneas de montaje, pero también elementos *andon* para ayudar a los gerentes a comprender el razonamiento de evaluación planteado.

Los resultados de la simulación han proporcionado información actualizada y de calidad para analizar y ayudar a tomar decisiones. Los resultados mostraron que la

eficiencia del sistema de manejo de material se puede mejorar mediante la introducción de cambios en el diseño, pero también con una implementación de políticas alternativas.

El estudio realizado también destaca que la complejidad del sistema de suministro actual causa congestión en los pasillos de la planta, lo que puede llevar a problemas de seguridad, como cuellos de botella, colas o accidentes. Estos aspectos se deben tener en cuenta al operar en las plantas si no se resuelven cambiando el diseño.

La estructura del sistema de información de los clientes no incluye los datos necesarios para ejecutar la simulación. Por lo tanto, se recomienda mantener actualizado el modelo de simulación para controlar los flujos de material y los problemas mencionados anteriormente. Gracias a la arquitectura de simulación de capas utilizada, una capa se puede cambiar sin que afecte a los otros subsistemas del modelo.

Este caso de estudio pone de manifiesto la necesidad de gestionar el tráfico de los elementos de mantenimiento en las líneas de montaje multimodelo, que cuentan con una mayor complejidad en cuanto a la gran variedad de referencias.

8 CASO DE ESTUDIO 3

8.1 Introducción

En este capítulo se presenta un problema de diseño de instalaciones en el que se quieren traer varias células de secuenciado a una instalación junto a una planta de montaje final de automóviles⁶. Estas células se encargan de clasificar y secuenciar las piezas y componentes, y colocarlos en carros que se entregarán a la línea de montaje final de una manera JIS. Las células llevan asociadas una gran actividad logística y generan diariamente miles de movimientos de carretillas para aprovisionar las células y suministrar con los carros a la línea de montaje.

Dada la complejidad del suministro desde y hacia las células, la gerencia de la fábrica decidió evaluar la propuesta del traslado. El problema principal que se aborda se relaciona con la seguridad de todas las actividades logísticas de entrada y salida involucradas en el proceso y que requieren del movimiento de diversos elementos de manutención y, en especial, de carretillas elevadoras y su convivencia con el flujo de operarios. Este tráfico debía ser considerado en detalle previamente a la migración de las células para tratar de seleccionar la mejor solución de diseño que sea eficiente y segura para el suministro.

Para ello, se propone aplicar la metodología de evaluación presentada en el capítulo 5, en la que se evalúa cuantitativa y cualitativamente el flujo de material del suministro a la línea de montaje. Se espera que los resultados proporcionen información relevante para conocer los problemas en el interior de la nueva instalación y en la planta de montaje y conseguir un diseño robusto.

Una vez identificados los problemas, para resolverlos hay que asignar las células dentro de la nueva instalación equilibrando la cantidad de movimientos a lo largo de la planta. Para ello se utilizará un procedimiento de optimización combinatoria basado en heurísticas de búsqueda local. En esta etapa se obtendrán cuatro alternativas que se presentan por la gerencia de la planta.

A los diseños de asignaciones definitivos para cada una de las cuatro alternativas, se evaluarán cuantitativa y cualitativamente. Al tratarse de diseños prácticamente definitivos se estimará el tráfico con ayuda de un modelo de simulación. Este modelo permitirá analizar la dinámica del sistema en la toma de decisiones y

⁶ Este capítulo es una versión ampliada de lo publicado en Saez-Mas et al., (2018).

obtener un diseño robusto. Con esta evaluación se espera conseguir un diseño y asignación definitivo y recomendaciones sobre cómo llevar a cabo la implementación de una forma segura para el suministro.

El resto del capítulo se estructura como sigue. La sección 2 presenta el estudio de caso. A continuación, se presentan cada una de las fases de la metodología aplicadas a este caso en cuestión, como es la fase preliminar, el diseño mediante optimización, la estimación cuantitativa mediante simulación por eventos discretos y la estimación cualitativa mediante el cuestionario. Con toda esta información se evaluarán las alternativas planteadas, identificarán los principales puntos críticos y se discutirán los resultados para seleccionar aquel diseño que mejor se ajuste a las necesidades. Finalmente, se cerrará el capítulo con las conclusiones del caso de estudio.

8.2 Descripción del caso de estudio

Este caso de estudio surgió a partir de los resultados del capítulo anterior en el que se realizó una evaluación del tráfico en una planta de montaje final de automóviles. En el capítulo anterior se identificaron algunos puntos críticos y una de las recomendaciones fruto de la evaluación consistía en acercar las células de secuenciado a su punto de consumo en la línea de montaje.

Las células de secuenciado son las responsables de preparar preensamblajes secuenciados y colocarlos en carros de cierta capacidad siguiendo la secuencia de la línea de montaje final. Cada célula generará preensamblajes que se entregarán en una estación de la línea.

Actualmente, estas células las gestionan dos operadores logísticos en siete instalaciones diferentes. En total hay 70 células de secuenciados que se encuentran repartidas en más de 15.000 m^2 . Algunas de estas instalaciones se encuentran a una distancia de 500 metros de la fábrica y, en otros casos, a más de 1 km de la planta de montaje OEM.

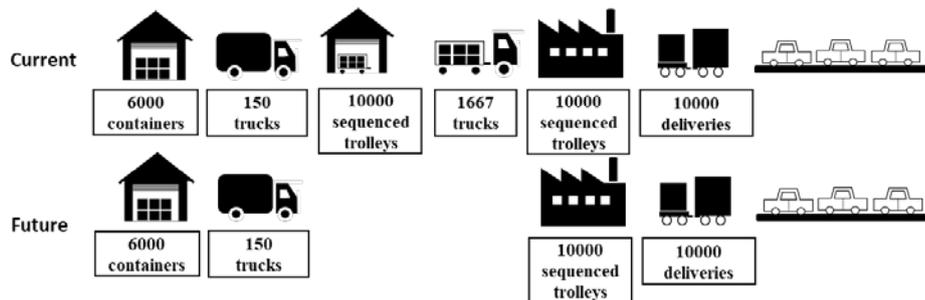
A las celdas se les suministran 6.000 contenedores diarios de material a las diversas instalaciones distribuidos entre 2.200 referencias para preparar los más de 10.000 carros secuenciados que requiere la línea de montaje final. Una vez se completan los carros de piezas secuenciadas en las células, estos se agrupan en un camión que no puede contener más de 6 carros por viaje, y se transportan desde las instalaciones de los operadores logísticos a la fábrica de montaje de automóviles. En la fábrica se descargan y se transportan mediante carretillas remolcadoras a las

estaciones de la línea de montaje. Esta última etapa de suministro corresponde con el suministro de los carros y el resto de flujos (*picking*, almacenamiento en línea...) evaluados en el caso de estudio del capítulo anterior.

El transporte de los carros secuenciados en camiones desde las instalaciones de los operadores logísticos hasta la fábrica suma más de 3.500 kilómetros por día. Además, de la evaluación del capítulo anterior se sabe que el suministro de este flujo tenía una gran repercusión dentro de la planta y generaban miles de kilómetros diarios de carretilla remolcadora. En base a las estimaciones anteriores, la dirección de la compañía vio necesario realizar cambios en el suministro.

El departamento correspondiente decidió traer las 70 células de secuenciado desde las instalaciones externas a una instalación existente dentro de la planta, moviendo una actividad a otras instalaciones. De manera que, tal y como se muestra en la Figura 26, al eliminar esta etapa de transporte de los carros en camiones, se conseguían ahorros logísticos estimados en decenas de miles de euros al año.

Figura 26. Etapas y cantidad de movimientos diarios para suministrar las piezas secuencias en la situación inicial y la futura deseada.

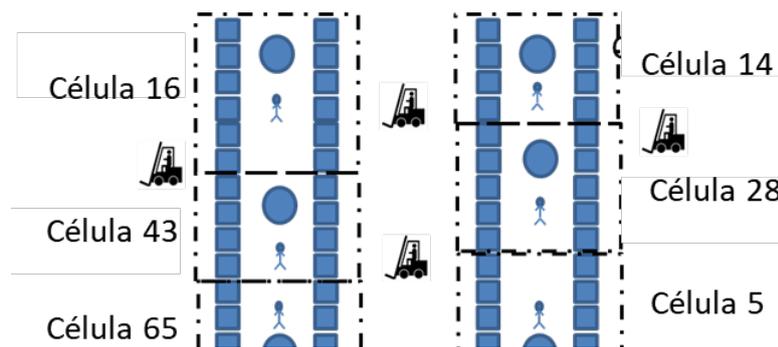


Fuente: Saez-Mas et al. (2018).

De la nueva instalación se sabe que consta de alrededor de 5,000 metros cuadrados y está ubicada junto a la línea de montaje final (instalación Call1 de la Figura 14 del anterior capítulo). Durante muchos años sirvió como almacén para el material recepcionado. En cuanto al diseño de esta instalación se sabe que dispone de seis muelles para reutilizar para el nuevo propósito, un acceso al exterior de la planta y 3 accesos directos al interior.

La disposición de las células dentro de la planta debía responder a un requisito de la empresa por el que las células se debían colocar en columnas de células una a continuación de otra con dos estanterías enfrentadas tal y como muestra la Figura 27.

Figura 27. Representación células de secuenciado.



Fuente: Elaboración propia.

Una columna de células está formada por un conjunto ordenado de células una a continuación de la otra. Cada célula de secuenciado constará de dos estanterías convencionales enfrentadas. En la parte baja de la estantería estará la zona de *picking* de la estación y en altura un almacén de reserva. En el pasillo interior entre ambas estanterías, se ubicarán los operarios de las células para realizar las operaciones de *picking* y ensamblaje necesarias. Por los pasillos adyacentes a las estanterías circularían carretillas elevadoras para reponer tanto las posiciones de *picking* como las de reserva. La longitud de cada célula varía en función del número de posiciones de *picking* que necesite y del tamaño de las piezas.

El objetivo de este diseño parecía ser el aprovechar las estanterías convencionales ya existentes en el almacén y poder albergar todo el producto dentro de la misma planta aprovechando la altura. La longitud de las columnas de células dependerá del número y de qué células tenga. También influirá su disposición a lo largo de la planta.

Como ya se había comentado anteriormente, cada célula corresponde a uno de los operadores logísticos y cada uno tiene una flota propia de carretillas y de personal.

El proceso de suministro a las células es el siguiente.

1. Los muelles tienen una ventana horaria para las llegadas de camiones. Una vez llega el camión esperado, se lleva a cabo la descarga. La descarga completa tomará un promedio de 40 minutos según las estimaciones del fabricante.
2. Una flota de carretillas descargará los palés desde los camiones y los ubicarán sobre las plataformas de tráileres remolcadores con capacidad para cuatro palés por cada plataforma.

3. Este tráiler se encuentra ubicado en la llamada estación de remolque 1 (TS1) ubicada junto a los muelles.
4. Los palés se transportarán desde el TS1 a una sección ubicada dentro de la nueva instalación que se denominará como estación de remolque 2 (TS2).

En TS2:

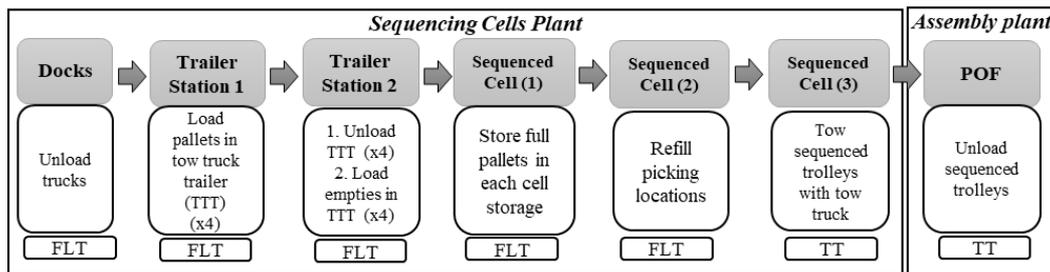
1. Los palés se ubican en la célula correspondiente uno a uno. Para ello se utilizarán carretillas elevadoras para poder acceder al almacén en altura de cada célula.
2. Las referencias que se agotan en la zona de *picking* de la célula se activan como una petición de material. Una carretilla elevadora acudirá a la señal y bajará un palé del almacén en reserva de la propia célula, sacará el palé vacío de la zona de *picking* y llenará la ubicación vacía con el palé lleno.
3. La carretilla elevadora transportará el palé vacío al TS2, desde donde se ubicarán en los tráileres remolcadores vacíos para completar la logística inversa del proceso y que vuelvan al TS1 y se puedan cargar en los camiones de vuelta al operador logístico.

El proceso de suministro desde las células hasta la línea de montaje con los carros secuenciados ya preparados es el siguiente:

1. Una carretilla remolcadora acudirá a la estación recogerá el carro y lo entregará en la estación pertinente.
2. Las carretillas remolcadoras podrán llevar de uno a cuatro carros secuenciados simultáneamente, tal y como se sugirió tras la evaluación del capítulo anterior. De este modo, las carretillas realizarán una ruta dentro de la planta y se consigue reducir los metros recorridos en el proceso de suministro.
3. La misma carretilla remolcadora realizará la logística inversa con los carros vacíos desde la línea de vuelta a la célula de secuenciado para repetir el proceso.

El tiempo asignado para la operación total tiene que ser inferior a 45 minutos, de los cuales el transporte no puede requerir más de 20 minutos. Por lo tanto, generalmente, no pueden albergar más de 20-30 subconjuntos consecutivos en el mismo carro secuenciado. La Figura 28 representa todos los etapas y operaciones anteriormente descritas y los elementos de manutención involucrados en el proceso de suministro.

Figura 28. Etapas de suministro de las piezas secuenciadas.



Fuente: Saez-Mas et al. (2018).

8.3 Fase 1: Preliminar

8.3.1 Identificación del problema y del objetivo

El caso planteado por el departamento de compras era de una elevada complejidad logística y presentaba limitaciones en el diseño para el departamento de logística. La gerencia de la planta sugirió la necesidad de involucrar a un grupo de trabajo externo para que evaluara la factibilidad de la propuesta y apoyara la toma de decisiones del diseño de la nueva instalación y del nuevo sistema de suministro.

Las principales preocupaciones eran: (1) Pasar las operaciones de 70 células de un espacio de 15,000 metros cuadrados a uno de 5,000. (2) Operar dentro de la planta tráileres remolcadores para aproximar los palés desde los el TS1 en los muelles al TS2 dentro de la planta, carretillas elevadoras para alimentar las células, y carretillas remolcadoras para remolcar los carros secuenciados desde las células hasta la línea de montaje y operarios dentro de las células. (3) Distribuir las columnas de células a lo largo de la planta para simplificar el flujo de material anteriormente descrito y evitar puntos críticos con flujos mixtos. (4) Acoger los casi 16,000 movimientos de elementos de mantenimiento que generan las células de secuenciado en una instalación 5,000 metros cuadrados y que cuenta únicamente con 2 accesos a la planta.

8.3.2 Recogida de datos

Para la recogida de datos, se pidió una actualización de los planos de la fábrica y de los ficheros de las distintas referencias para cada una de las políticas de suministro para poder estimar el número de entregas diarias y el punto de origen y destino de cada una de ellas.

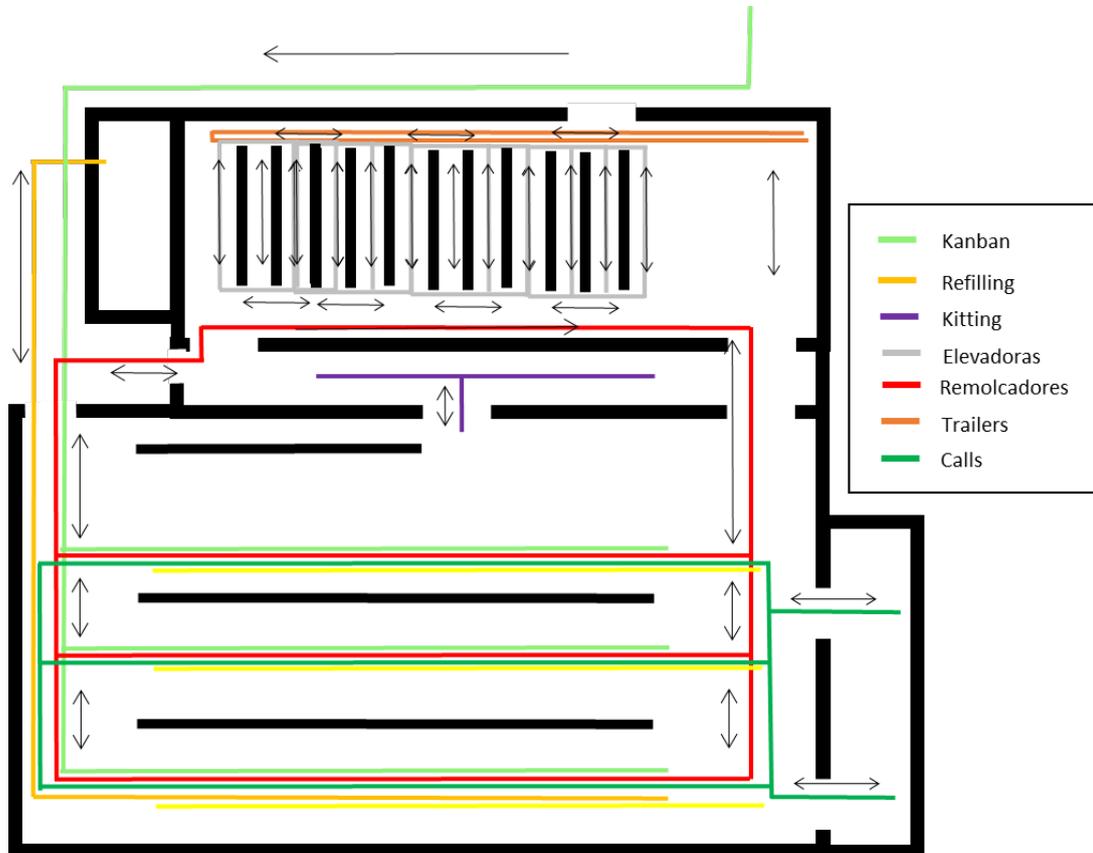
También se han recogido otros datos de la planta como la producción diaria, los turnos de trabajo, tiempos de descanso, tiempos de operación de los elementos de

manutención, etc. Estos datos se han presentado en la descripción del caso y el resto se presentan más adelante en el apartado de experimentación del modelo de simulación.

8.3.3 Identificación de los flujos y cuantificación estática de estos

Los diferentes flujos de materiales identificados se encuentran representados en la Figura 29 y estimados en la Tabla 43. La nueva instalación se encuentra en la parte superior de la figura y una parte de la planta de montaje se encuentra representada en la parte inferior de la figura, la cual tiene un mayor volumen.

Figura 29. Representación física de la planta de montaje y de la nueva instalación a diseñar con los distintos flujos de materiales y su recorrido.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 39. Estimación estática de los movimientos para cada flujo de materiales.

Flujo	Movimientos por hora
Kanban 1	18,83
Kanban 2	8,78
<i>Refilling</i>	46,27
<i>Kitting</i>	80,49
Elevadoras	28,29
Remolcadoras 'Trim'	219,20
Remolcadoras 'Chasis'	84,46
Tráileres	35,37
Calls	124,68
Cajas de cartón	28,29
Otros	34,15

Fuente: Elaboración propia.

8.4 Fase 2: Diseño

8.4.1 Diseño preliminar

Inicialmente se estuvo trabajando en el diseño de múltiples propuestas para la localización de las columnas de las células y una topología de los pasillos adyacentes y de los pasillos de la línea de montaje final apropiada al flujo de material existente. La Figura 30 muestra cuatro de las propuestas finales. Para cada una de ellas se evaluaron la red de pasillos, su direccionalidad, los tipos de medios de manutención coexistentes y los cruces entre flujos entre otros aspectos. Esto se realizó siguiendo las consideraciones de diseño de sistemas de aprovisionamiento propuestas en la metodología del capítulo 4 sobre la evaluación del flujo de material cualitativa.

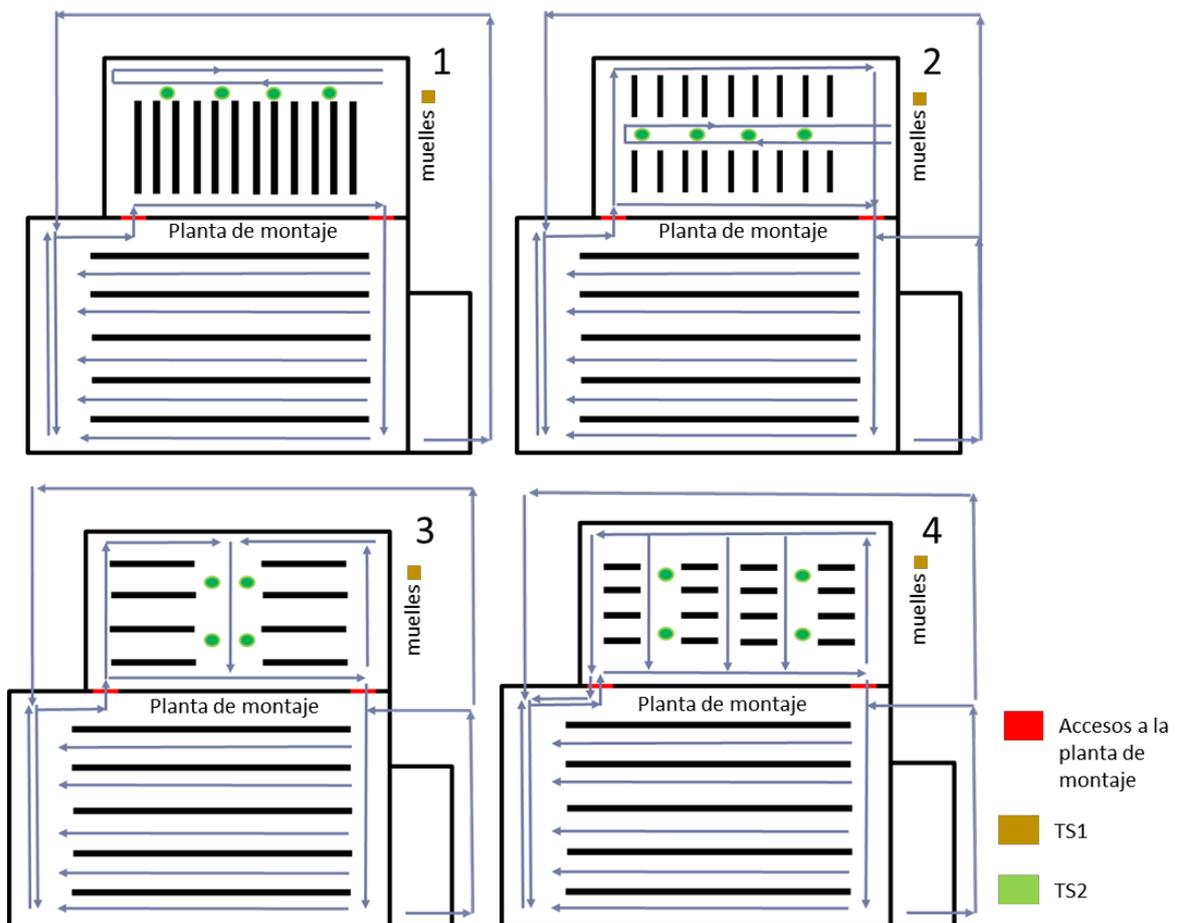
El *layout* de la primera propuesta consistiría en un pasillo superior bidireccional para que los tráileres puedan acceder desde la TS1 de los muelles a los TS2 dentro de la planta. El pasillo longitudinal inferior está destinado al movimiento de las carretillas remolcadoras con los carros secuenciados. Los pasillos transversales de la nueva instalación serán bidireccionales para el movimiento de las carretillas elevadoras. Estas podrán pasar de un pasillo a otro cruzando por los pasillos longitudinales superior e inferior. Los pasillos superiores junto a la línea de montaje se recomiendan que sean unidireccionales.

Las principales características de esta propuesta serían que se consigue separar el flujo de las carretillas remolcadoras y de los tráileres. El pasillo de los tráileres deberá ser lo suficientemente ancho como para permitir el giro al final del pasillo de estos y la circulación de dos carretillas en sentido opuesto. El retorno de los palés

vacíos desde TS2 incrementa el tiempo de operación de los tráileres, lo que puede generar congestión en el pasillo superior durante las operaciones de llenado. Este pasillo también experimenta un flujo mixto, ya que las carretillas elevadoras lo utilizarán para cambiar de un pasillo transversal a otro durante el reparto de palés.

Los carros secuenciados saldrán llenos por el acceso derecho y volverán vacíos de la planta por el acceso izquierdo. Para no acceder las carretillas remolcadoras a los pasillos transversales, los operarios de las células arrastrarán los carros secuenciados terminados al pasillo inferior a la espera de que sea remolcado. El principal problema de esta propuesta es que los pasillos de columnas de células son muy largos, y el pasillo inferior ha de ser lo suficientemente ancho para poder dejar los carros secuenciados terminados, que las remolcadoras maniobren para remolcarlos, y para que las remolcadoras ya cargadas puedan circular libremente.

Figura 30. Principales propuestas de *layout* evaluadas.



Fuente: Elaboración propia.

La segunda propuesta trata de separar en tres pasillos principales longitudinales, el flujo de suministro de los tráileres remolcadores desde TS1 a TS2 en el pasillo intermedio, y el flujo de suministro de carretillas remolcadoras de carros secuenciados en el pasillo superior e inferior. De este modo se consigue repartir el flujo de las carretillas remolcadoras entre dos pasillos en lugar de uno.

Esta propuesta tiene las columnas de células más pequeñas. Los pasillos transversales los utilizarían únicamente las carretillas elevadoras y girarían de uno a otro a través de los pasillos longitudinales superior e inferior. Al ser pasillos cortos, podrían ser unidireccionales y forzar a que las carretillas vayan hasta el final del pasillo para acceder a otro. Este diseño también propone que el pasillo longitudinal inferior sea unidireccional.

Los carros secuenciados saldrán llenos por el acceso derecho y volverán vacíos de la planta por el acceso izquierdo. Para no acceder las carretillas remolcadoras a los pasillos transversales, los operarios de las células arrastrarán los carros secuenciados terminados al pasillo inferior a la espera de que sea remolcado. El principal problema de esta propuesta es que las remolcadoras con los carros secuenciados realizan un mayor trayecto por la planta. Además, el pasillo transversal que linda con los muelles de descarga, albergaría carretillas elevadoras en una dirección, carros secuenciados en la misma, y en otra dirección los tráileres remolcadores.

La tercera propuesta plantea columnas de células longitudinales y más cortas y con las estaciones TS2 en un pasillo transversal intermedio. Los tráileres remolcadores realizarían una vuelta completa al bloque de columnas de células de la derecha, y las carretillas remolcadoras de carros secuenciados utilizarían los pasillos superior e inferior y los transversales de la derecha e izquierda. El principal problema de esta propuesta es que todos los elementos circularán por la parte izquierda de los pasillos superior e inferior y por el transversal de la derecha, luego no hay una separación de flujo clara. Además, esta alternativa tiene menor espacio disponible para colocar las células porque hay un mayor número de pasillos principales que en las anteriores propuestas.

La cuarta propuesta plantea cuatro bloques de columnas de células con más pasillos transversales para uso de los carros secuenciados. Además, uno de los accesos sería bidireccional para ubicar junto a ese acceso las células de carros secuenciados con destino sur de la planta de montaje, separando así las células con destino más próximo a la nueva instalación por el acceso derecho y las células con punto de

consumo en el sur de la planta, por el acceso izquierdo. Este último acceso también serviría para el retorno de todas las carretillas remolcadoras. El principal problema de esta propuesta es que el flujo de carros secuencias y de tráileres remolcadores es común. Un acceso que debe abarcar todo el retorno de vacíos y también parte de las salidas puede ser excesivo.

Después de presentar las propuestas anteriores y su evaluación, la gerencia de la planta decidió seleccionar la primera propuesta por ser la que mejor separación de los flujos conseguía. Para poder asignar las 70 celdas, esta propuesta requiere de 20 columnas de células colocados transversalmente y 21 pasillos adyacentes a las columnas. Cada pasillo tendrá como máximo 65 metros de longitud, pudiendo ser menor según qué células se asignen y la longitud de estas.

Los gerentes de la planta consideraron interesante agrupar las células dentro de la instalación según el punto de consumo que tendrán en la línea de montaje, (trim más cercano y chasis más alejados) para facilitar la construcción de rutas de entrega en un futuro. Además, recalcaron que habría que intentar tener en cuenta que las células pertenecen a dos operadores logísticos diferentes con sus propias flotas y trabajadores y, por tanto, su trabajo puede estar descoordinado. Esto planteaba cuatro alternativas de asignación de células a evaluar, (1) no separar las células, (2) separar células según su punto de consumo, (3) separarlas según el operador logístico al que pertenezcan y (4) separarlas según ambos aspectos.

Del diseño seleccionado y con ayuda de los valores de la estimación estática de la Tabla 43 se puede ver que, en la mayoría de los puntos de la planta de montaje experimenta casi 170 movimientos de carretilla a la hora. Esta cantidad de movimientos es difícil de reducir debido al volumen de actividad de la planta y también de redistribuir, ya que el resto de accesos o pasillos también cuentan con un elevado volumen de movimientos. De este modo, se deben de trabajar con las recomendaciones de medidas de seguridad.

Hay 3 puntos que superan los 350 movimientos por hora según estimaciones basadas en los datos cuantificados estáticamente en el apartado anterior, como son los dos pasillos principales de la planta de montaje que albergan todos los flujos de suministro, y el interior de la nueva instalación de las células de secuenciado. En concreto, el pasillo principal inferior de la nueva instalación registra 400 movimientos de carretilla a la hora, más toda la operativa de cargar y descargar cada una de las carretillas remolcadoras con 4 carros secuenciados.

Este pasillo supera el tráfico y actividad logística respecto a cualquier otro punto de la planta de montaje por lo que será necesario aplicar otras medidas durante el diseño y asignación de las células, y no solo las medidas de prevención en las instalaciones.

En una primera instancia, el problema dentro de la planta se relaciona con la seguridad debido a todas las actividades logísticas de entrada y salida involucradas en el proceso de suministro y que requieren de miles de movimientos en una instalación de tamaño reducido con personal circulando también a pie.

Debido a la imposibilidad de eliminar la interacción entre los elementos de manutención y los trabajadores, y teniendo en cuenta las limitaciones físicas de la instalación, en este caso se tratará de buscar combinaciones de asignación de células dentro del diseño seleccionado de las columnas de células, que distribuyan equilibradamente la carga logística de las carretillas elevadoras y de carros secuenciados a lo largo de la planta.

Para ello, una vez decidida la disposición de las células, habrá que asignar en qué columna y en qué posición colocar cada una de las 70 células. Se recurrirá a un modelo de optimización con el que conseguir una buena asignación de las células que equilibre la cantidad de movimientos a lo largo de los pasillos de la planta.

A continuación, se aplicará la metodología de evaluación de los sistemas de suministro a líneas de montaje. En primer lugar, se evaluará cuantitativamente el flujo de material. En este caso se utilizará la simulación por eventos discretos para conocer la factibilidad del diseño y asignación desde un punto de vista del tráfico. Con la información proporcionada por el modelo se espera obtener información relevante para ayudar en el proceso de toma de decisiones y proponer mejoras del diseño de suministro. A continuación, se evaluará cualitativamente el diseño completo y el estado actual de la instalación para ver qué hay que mejorar antes de iniciar la migración de las células. Al tratarse de un diseño definitivo se aplicará la herramienta de auditoría propuesta para la metodología y las recomendaciones de implementación.

8.4.2 Modelado del problema

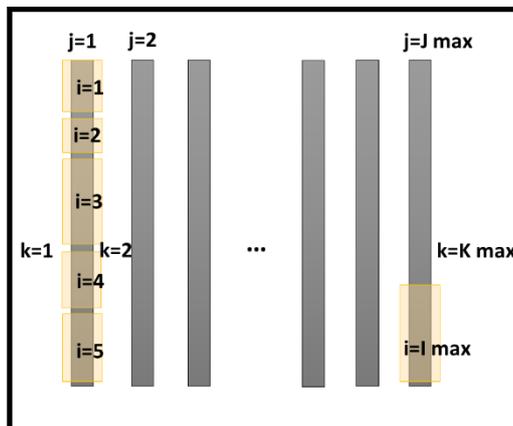
La formulación matemática representa la nueva instalación de las células anteriormente descrita, donde las células de secuenciación $\{I\}$ deben ubicarse a lo largo de las columnas de células $\{K\}$ disponibles. La logística involucrada no se ha considerado para la formulación matemática de la siguiente manera. Se supone que

los movimientos diarios de los elementos de mantenimiento generados en una columna de células se distribuyen equitativamente entre sus dos pasillos adyacentes.

La formulación matemática trata de minimizar la cantidad total de movimientos generados en el pasillo que tiene el mayor tráfico después de un día medio de producción. El resto de actividades logísticas y los aspectos dinámicos del sistema se han pasado por alto en esta etapa de optimización. EL objetivo es equilibrar el flujo en toda la instalación y minimizar la existencia de puntos críticos en el diseño.

La Figura 31 ilustra el diseño de la instalación descrita donde $j \in \{1 \dots J_{max}\}$ se refiere a las columnas de células, k se refiere a los pasillos entre ellas, e l identifica el número de células asignadas a una posición dada.

Figura 31. Simplificación del *layout*.



Fuente: Saez-Mas et al. (2018).

Índices

i :	células	$i = 1 \dots l$
j :	Columnas de células	$j = 1 \dots J$
k :	Pasillos	$k = 1 \dots K$

Parámetros

T_j	Longitud de la columna (j)
S_i	Longitud de la célula (i)
M_i	Número de movimientos promedio originados por la célula (i) durante un día de producción.

Variables

$$x_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{si la célula (i) se localiza en la columna (j)} \\ 0 & \text{si la célula (i) no se localiza en la columna (j)} \end{cases}$$

$$Z_k = \text{Número de movimientos de elementos de manutención generados en cada pasillo (k) durante un día de producción asociada a una asignación de células de producción.}$$

Función objetivo

La función objetivo (OF1) minimiza el número de movimientos generados en el pasillo que genera un mayor tráfico, lo que también se conoce como intensidad. Se ha propuesto una segunda función objetivo (OF2). Los principales motivos fueron la existencia de un gran número de soluciones equivalentes, la simetría en las soluciones, y que, aunque la primera función objetivo minimiza el pasillo más congestionado, la primera función objetivo no se preocupa si la congestión en el resto de pasillos se puede equilibrar.

$$\min \left\{ \max_1 Z_k \right\} \quad \text{OF 1}$$

$$\min \sum_{h=1}^5 h - \max_k Z_k \quad \text{OF 2}$$

Restricciones

Este modelo incluye tres conjuntos de restricciones que consideran los aspectos físicos y lógicos del sistema.

$$\sum_j^n x_{i,j} = 1 \quad \forall i \quad (1)$$

$$\sum_i^n S_i \cdot x_{i,j} \leq T_j \quad \forall j \quad (2)$$

$$Z_k = \left(\sum_i^n \frac{(M_i x_{i,j} + M_i x_{i,j+1})}{2} \right) \quad \forall k \text{ siendo } k=j \quad (3)$$

La ecuación (1) asegura que la célula (i) está ubicada al menos en una columna (j), en una y solo una. La ecuación (2) verifica que las células asignadas a cada columna (j) no excedan la longitud de la columna.

La ecuación (3) calcula el número de movimientos por pasillo (k). Como se mencionó anteriormente, se supone que el tráfico generado por las columnas (j) se divide equitativamente entre sus dos pasillos adyacentes.

Dado el número de combinaciones posibles y la dificultad de considerar todos los requisitos del cliente en el modelo matemático, se ha decidido que se descomponga el problema y se utilizará un enfoque de resolución heurístico de búsqueda local para este tipo de problema.

8.4.3 Modelo de optimización

8.4.3.1 Ordenación y asignación de las células en columnas

En esta etapa se van a considerar las 4 alternativas anteriormente comentadas. Por un lado, se desea conocer el efecto de separar las células de acuerdo con la ubicación de su punto de destino de la línea al que suministra, que puede ser trim (más cerca de la nueva instalación) o chasis (al sur de la planta de montaje y más alejado de las células). Al hacerlo, las rutas de transporte de los carros secuenciados podrían mejorarse. Por otro lado, ya que las células pertenecen a diferentes operadores logísticos y trabajar conjuntamente en un mismo pasillo o zona podría suponer una falta de coordinación, las células también se separarán según este criterio.

Los dos criterios anteriores forman 4 alternativas posibles: (1) no separar células y colocarlas indistintamente sin considerar ninguno de los dos criterios, (2) separar células por operador, (3) separar células por punto de destino y (4) separar células por operador logístico y por punto de destino. Estas alternativas dan lugar a una descomposición del problema en un conjunto de problemas secundarios que se considerarán independientes en las alternativas 2, 3 y 4.

Para asignar las células a las columnas de células se va a utilizar el siguiente algoritmo. Primero las células se clasifican en un vector de acuerdo con un criterio particular "criterio de ordenación". Según una "estrategia de asignación" se asignarán a la columna de células de acuerdo al orden del vector anterior. Este proceso se seguirá hasta asignar todas las células del vector con éxito.

Los criterios de ordenación utilizados son los siguientes:

- Ordenación 1. Las células se ordenan aleatoriamente.
- Ordenación 2. Las células se ordenan de mayor a menor cantidad de movimientos que generen.
- Ordenación 3. Las células se ordenan de menor a mayor cantidad de movimientos.

- Ordenación 4. Las células se ordenan según su longitud, de la más larga a la más corta.
- Ordenación 5. Las células se ordenan según su longitud, de la más corta a la más larga.

Las estrategias de asignación utilizadas son las siguientes:

- Asignación 1. Las columnas se van llenando gradualmente. La columna $k + 1$ no comienza a llenarse hasta que la siguiente célula del vector que se va a colocar no cabe en la columna k .
- Asignación 2. Las células se colocan en cada una de las columnas alternando el orden de estas ($k, k + 2, k + 4 \dots$). Cuando alcanza $k \max$ se vuelve al principio y se llenan las columnas vacías. El objetivo es colocar una sola célula en cada columna y el resto se ubican en la columna con más metros disponibles.
- Asignación 3. Las células se colocan en cada columna alternando el orden ($k, k + 2, k + 4 \dots$). Cuando alcanza $k \max$ se vuelve al principio k y se llena las columnas vacías. Cada columna tendrá una sola célula colocada y el resto se irán ubicando en la columna con menos metros disponibles.
- Asignación 4. Este enfoque busca equilibrar el número de células por columna. Por lo tanto, las células se colocan de acuerdo con el orden preestablecido del vector de células. Se coloca una célula en cada columna, cuando se llega a $k \max$, se vuelve al principio. En el caso de que la célula que se va a colocar no quepa en la columna asignada, las células se colocarán en la siguiente columna. En la siguiente ronda de llenado se tratarán de llenar los huecos libres de la última ronda.
- Asignación 5. Este enfoque busca asignar los pasillos más abarrotados en los extremos donde los pasillos de los extremos solo alimentan una columna de células. Las células se colocan alternando una columna del principio con una del final (por ejemplo, $1, k \max, 3, k \max - 2, 5, k \max - 4 \dots$). Cuando el algoritmo alcanza la columna central, se procede de la misma manera, pero esta vez se empezarán a llenar desde las columnas internas hasta las columnas externas.

Para resumir, el algoritmo elige primero una de las 4 alternativas, después, selecciona una combinación de criterios de ordenación y de estrategias de asignación. Ambas opciones se combinarán para encontrar el diseño que minimice la OF1 y OF2 para cada alternativa.

Puede suceder que algunas de las combinaciones de ordenación y asignación propuestas no permitan encontrar una solución viable, en ese caso no se considerará. Además, se sabe que algunas de las combinaciones no ofrecerán una solución que minimice el OF1 y OF2. Para aquellas combinaciones en las que la ordenación o asignación se haya realizado aleatoriamente, esta se repetirá N veces para mejorar la robustez de la solución.

8.4.3.2 Mejora local de la asignación

Una vez lanzadas las combinaciones posibles para cada una de las 4 alternativas, se aplicarán dos heurísticas de búsqueda local. Ambas realizan pequeños cambios en el diseño y buscan reducir la cantidad máxima de movimientos en los pasillos.

La primera heurística consiste en intercambiar entre sí las células de manera guiada. El proceso comienza seleccionando aleatoriamente una de las células ubicadas en cada una de las dos columnas adyacentes al pasillo que genere un mayor número de movimientos. A continuación, se trata de intercambiar cada una de las células restantes por una de esas dos columnas. Cuando se encuentra un intercambio físicamente factible y que mejore el OF 1, entonces el intercambio tiene lugar. Este proceso se repetirá siempre que los intercambios sean posibles, dentro de las restricciones físicas, y mientras la OF 1 siga mejorando.

La segunda heurística consiste en intercambiar columnas de células completas de manera no guiada. La heurística trata de intercambiar todas las columnas entre sí de izquierda a derecha. El primer cambio que logre la reducción de OF 1 y OF2 será aceptado y las heurísticas continuarán buscando nuevos intercambios a partir del mismo.

Ambas heurísticas se aplican de forma individual y ordenada para cada una de las soluciones factibles obtenidas para cada alternativa. En concreto, el bucle heurístico se repetirá cuatro veces para cada combinación de ordenación y asignación: aplicar heurística 1; aplicar heurística 2; aplicar heurística 1 y después heurística 2; aplicar heurística 2 y después heurística 1.

A continuación, se presenta el proceso utilizado para encontrar la configuración de diseño más adecuada para cada una de las cuatro alternativas principales deseadas. Durante el proceso se utilizarán los siguientes contadores:

- El contador V indica el número de combinaciones entre la ordenación de las células y las asignaciones.

- El contador N cuenta el número de combinaciones aleatorias generadas y muestra la cantidad de repeticiones.
- El contador H identifica la combinación de heurísticas aplicadas.

En resumen, para esta fase de optimización de la asignación de las células, los pasos seguidos son los siguientes:

- Paso 1. Seleccionar el criterio de diseño basado en la alternativa 1, 2, 3 o 4.
- Paso 2. Establecer los parámetros, la OF1 y OF2, las variables y los límites. Inicializar contadores V, H y N.
- Paso 3. Definir una combinación inicial de ordenación y asignación de células para crear una solución. V++.
- Paso 4. Generar solución. N ++
- Paso 5. Si la solución no es factible, omitir la combinación escogida e intentar otra combinación en el paso 3.
- Paso 6. Aplicar las cuatro heurísticas a cada solución factible de la alternativa. H ++
- Paso 7. Si la solución obtenida es mejor que la anterior, actualizar OF1 y probar con otra combinación de heurísticas.
- Paso 8. Si la ordenación de las células es aleatoria y $N = 200,000$, seguir adelante con el proceso; de lo contrario, vuelva al paso 4 para seleccionar otra combinación.
- Paso 9. Si $H = 4$ pasa al siguiente paso; De lo contrario, vuelva al paso 6 para aplicar otra heurística.

Durante la etapa de optimización, la cantidad total de combinaciones entre ordenación de células y estrategias de asignación, V, se estableció en 25. Cada combinación de ordenación y asignación se probó con cada combinación de heurísticas. El tiempo de cálculo de la etapa 2 de optimización es de alrededor de 3-4 horas para cada alternativa.

8.5 Fase 3: Estimación cuantitativa

8.5.1 Modelar alternativa/as en software de simulación por eventos discretos.

El modelo de simulación se implementó en SIMIO, un software comercial de DES. La API de SIMIO se puede conectar con el modelo de optimización. Los algoritmos fueron programados en C# e implementados en SIMIO. El procesamiento de los

resultados del modelo de optimización y su incorporación al modelo y su simulación requieren aproximadamente 40 minutos para cada alternativa. El modelo de simulación ha sido validado con las estimaciones estáticas previamente obtenidas al aplicar por primera vez la metodología.

Para cada una de las cuatro alternativas de diseño obtenidas mediante el proceso de optimización combinatoria, se ha evaluado el flujo de material con simulación. En esta etapa el modelo de simulación sí que tiene en cuenta toda la logística involucrada en el proceso de suministro y demás aspectos dinámicos explicados en el caso de estudio y que se pasaron por alto durante la optimización.

El modelo de simulación se diseñó en base al enfoque de simulación en 4 capas (Saez-Mas, Garcia-Sabater, y Morant-Llorca, 2018). Este enfoque abarca la red, la lógica, la base de datos y la capa visual.

- La red cubre todos los caminos y elementos del sistema como cruces, línea de montaje, accesos, células, TS1, TS2, muelles, etc.
- La capa lógica funciona como un sistema de gestión de almacenes donde se generan todas las peticiones de actividad de carretillas y las que se van generando en cadena a partir de otras. Por ejemplo, la llegada de un camión requiere de carretillas elevadoras para descargarlo, generará el movimiento de los tráileres remolcadores entre el TS1 y los TS2. En los TS2 acudirán las carretillas elevadoras a descargar las plataformas del tráiler. Las células actúan como cajas negras, es decir, se asume que la carga de trabajo para el operario es la adecuada. El modelo considerará la petición de material descontando el stock en célula y generará petición de carretilla elevadora para ir a reponer una posición de *picking*. Del mismo modo, el sistema descontará el stock de los preensamblajes de los carros secuenciados en la línea y generará la petición de una carretilla remolcará que acudirá con un carro lleno y recogerá el vacío.
- La base de datos incluye datos de entrada y salida necesarios para administrar el modelo de simulación. Recogerá los tiempos de operación, las ventanas horarias de los muelles, la capacidad de carros y elementos de mantenimiento. Para cada célula se sabrá qué cantidad de palés requiere para alimentarse cada día, y cuantos carros secuenciados generará.
- La capa visual proporciona un aspecto real a la planta y facilita la conexión entre el modelo de simulación y el usuario final. En este caso se ve la línea de montaje funcionando con vehículos, el movimiento de las carretillas, y

se han utilizado varios elementos de *andon* para resaltar los diferentes medibles de tráfico.

En cuanto al modelo de simulación, se sabe que el sistema de gestión de almacenes atiende las tareas de logística de manera que el primero en llegar es el primero en salir (FIFO), y se permite que sea el software de simulación quien decida la ruta más corta para ejecutar el transporte. Además, la secuencia de la línea de montaje multimodelo viene dada por la capa lógica utilizando la producción diaria y varias restricciones.

8.5.2 Definir medibles del tráfico necesarios e Identificar zonas a evaluar

Los medibles a utilizar en este caso de tráfico y seguridad serán en cada uno de los pasillos de la nueva instalación la congestión media y máxima observada, y en los cruces, intersecciones y accesos la intensidad horaria. Este medible coincide con la cantidad promedio de elementos de manutención que hay simultáneamente en un pasillo. La intensidad permite conocer el impacto de la producción en secciones específicas de la planta y la interacción de los vehículos para identificar posibles puntos críticos que experimentan un gran volumen de movimientos.

Las zonas a evaluar serán cada uno de los pasillos de la nueva instalación y todos los cruces, intersecciones y accesos a esta.

Aunque los pasillos se estimaron en 65 metros, se experimentó con la posibilidad de dar una holgura de un metro a la longitud de los pasillos. Al cambiar este parámetro de modelo, se obtuvieron otras soluciones con mejor OF1 y OF2 que las actuales para estas alternativas. Sin embargo, esta opción no se analizó completamente porque estaba fuera del alcance y no había evidencia de que fuera factible para el cliente.

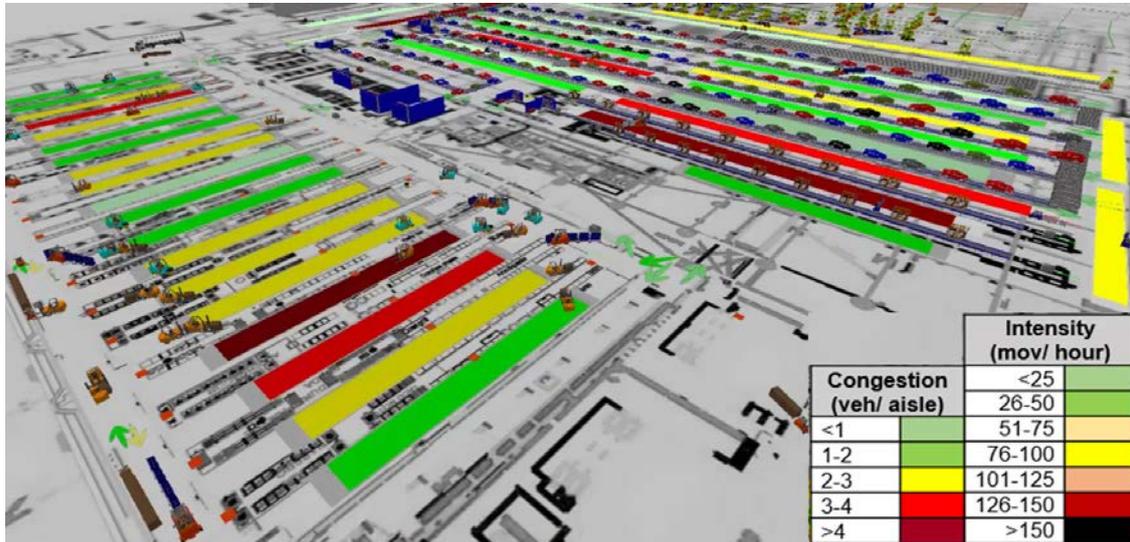
8.5.3 Incluir elementos *andon* en el modelo y realizar la experimentación

La simulación se utilizó para visualizar los resultados de los medibles del tráfico mediante elementos *andon*. Las flechas representan la intensidad horaria. Las barras de colores estiman la congestión promedio. Este elemento *andon* guarda el valor máximo de congestión alcanzado después de un día de simulación.

La Figura 32 representa el modelo de simulación, en la parte principal se ve la nueva instalación de las células de secuenciado y al final de la imagen, la línea de montaje. En esta imagen se puede ver los vehículos en la línea de montaje y las carretillas

llevando a cabo el suministro. La Figura 32 también recoge la equivalencia en colores de la intensidad y la congestión.

Figura 32. Vista del modelo de simulación de la nueva instalación y del resto de la planta de montaje con los elementos *andon* y sus intervalos de medida.



Fuente: Saez-Mas et al. (2018).

8.6 Fase 4: Estimación cualitativa

8.6.1 Recorrer la planta, seleccionar y recoger datos de las zonas de muestra

Durante esta fase, se recorrió la planta completa y se identificaron que el principal problema se encontraba en los accesos a las plantas y en los pasillos de la nueva instalación. Cuando se realizó el análisis solo se había iniciado el proceso con tres líneas.

Para la recogida de datos se tomaron nota del interior de la nueva instalación y considerando el nuevo diseño interior. Estos datos se anotaron junto a cada pregunta del cuestionario de diversos accesos y pasillos revisados, para su posterior uso en el cuestionario.

8.6.2 Aplicar el cuestionario de la herramienta de auditoria

Con la información recogida durante las tareas anteriores, se completó finalmente el cuestionario cualitativo. Los resultados se encuentran descritos en el apartado 12.3 del capítulo 12 de anexos.

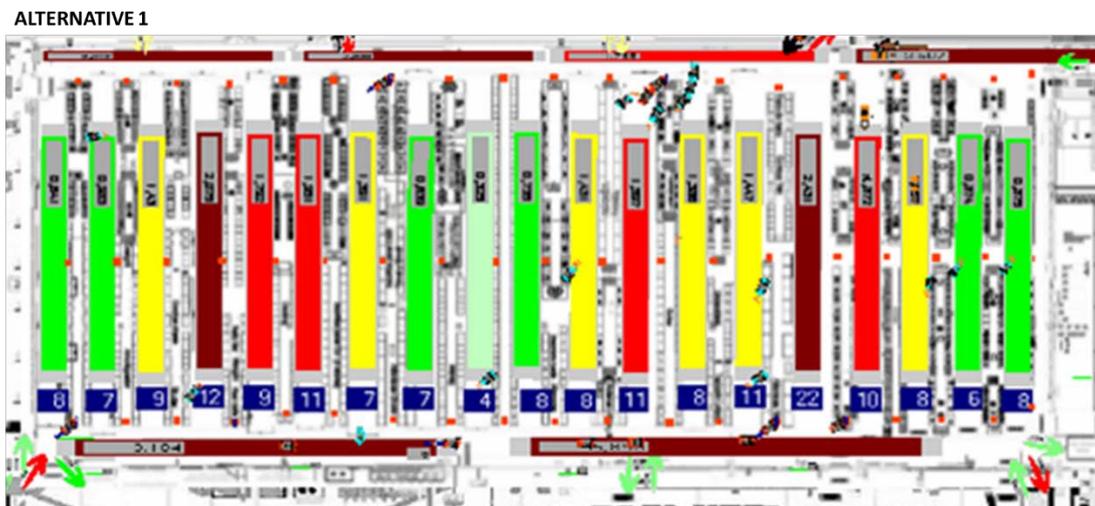
8.7 Fase 5: Evaluación

8.7.1 Evaluar los resultados de la estimación cuantitativa

El objetivo de esta evaluación general previa ha sido validar la propuesta anterior y, con ayuda de los resultados cuantitativos y cualitativos, detectar los principales puntos críticos resultado de incorporar la actividad de secuenciados en la nueva instalación y en la planta de montaje final. Se considera punto crítico a aquella sección que, por sus características, genera una gran cantidad de movimientos, cruces entre diferentes flujos o incluso ambas, y, por consiguiente, pueden suponer un punto de riesgo para el suministro de material. Este riesgo puede ser de accidentalidad o de retrasos para el suministro.

La Figura 33, Figura 34, Figura 35 y Figura 36 representan los resultados cuantitativos de la simulación para las 4 alternativas evaluadas. En cada una de ellas se puede ver el color y el valor obtenido para la congestión promedio en las barras de colores de cada uno de los pasillos. El recuadro azul representa el valor máximo de la congestión registrado después de 24 horas de simulación. En los resultados se puede ver la existencia de pasillos saturados y con máximos superiores a las 5 carretillas en casi todos los pasillos.

Figura 33. Resultados de la congestión media, máxima e intensidad para la alternativa 1 en la que no se considera la separación de células por operador o punto de destino.

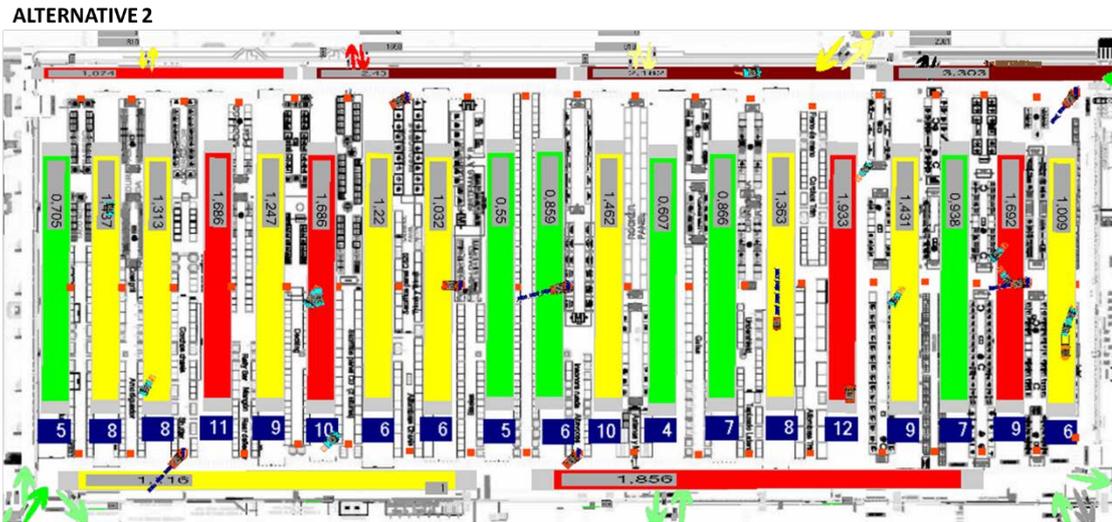


Fuente: Saez-Mas et al. (2018).

Las flechas de colores colocadas en accesos representando la intensidad prácticamente ya se conocía por la estimación estática realizada previamente. Con la simulación se ha comprobado que los resultados de la estimación estática y de la simulación son equivalentes. También ha permitido comprobar la existencia de

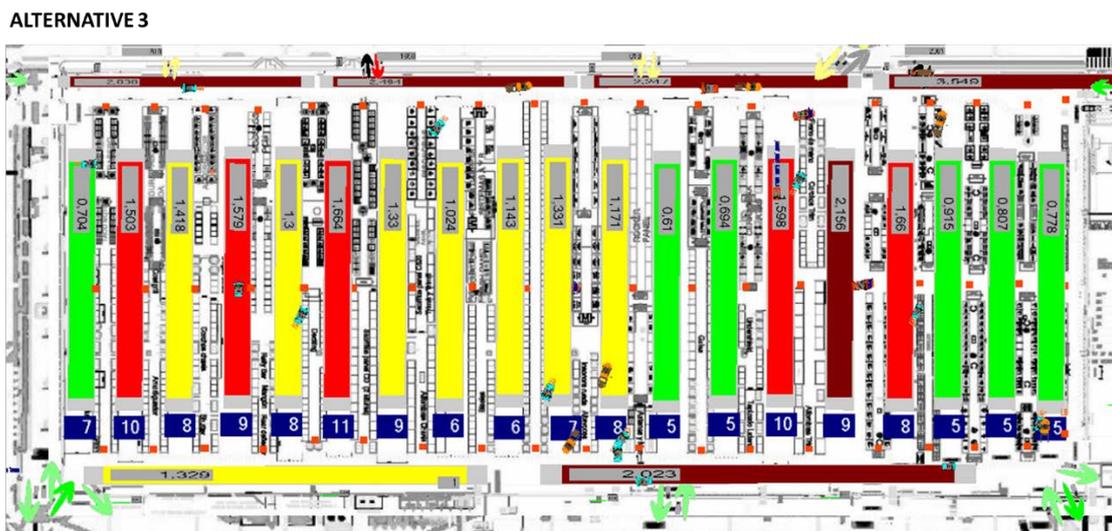
caminos más cortos en alguno de los flujos, ya que el simulador selecciona estos por defecto.

Figura 34. Resultados de la congestión media, máxima e intensidad para la alternativa 2 en la que se separa las células por operador y por punto de destino (trim o chasis).



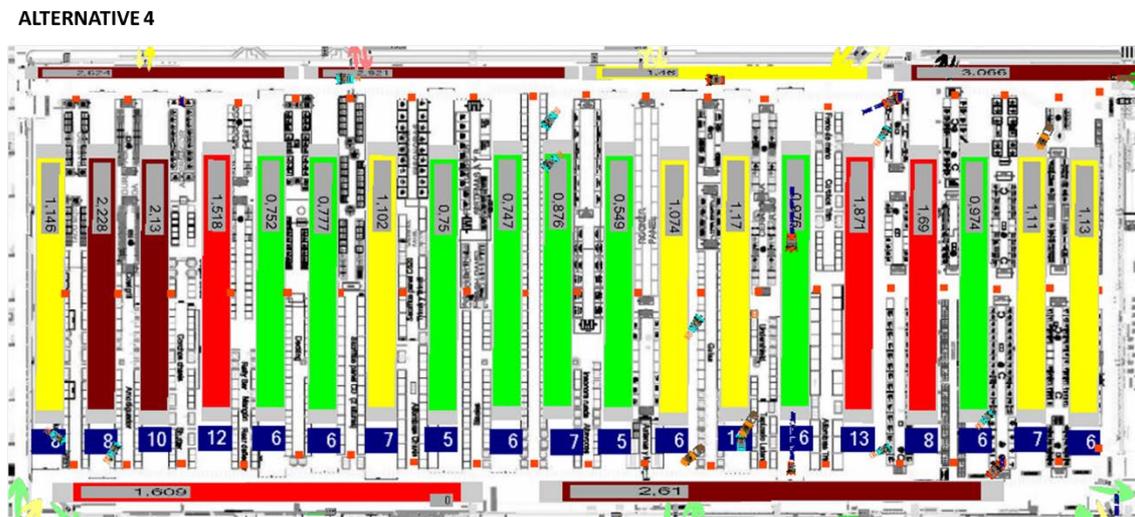
Fuente: Saez-Mas et al. (2018).

Figura 35. Resultados de la congestión media, máxima e intensidad para la alternativa 3 en la que se separa las células por punto de destino (trim o chasis).



Fuente: Saez-Mas et al. (2018).

Figura 36. Resultados de la congestión media, máxima e intensidad para la alternativa 4 en la que se separa las células por operador.



Fuente: Saez-Mas et al. (2018).

8.7.2 Evaluar resultados de la estimación cualitativa

De los resultados de la herramienta de auditoría cualitativa hay que destacar varios aspectos, como las condiciones para los trabajadores de esa instalación. El nivel de ruido de la planta ya era elevado con la baja actividad en el momento del análisis. Al estar ubicados los carros secuenciados sobre soportes metálicos y requerir la entrega de cientos de carros a la hora, el nivel de ruido será muy elevado. Teniendo en cuenta que habrá cientos de carros simultáneamente el nivel de ruido será excesivo. Las señales actualmente existentes en la planta estarían dañadas y/o mal ubicadas respecto a la nueva actividad de la instalación.

Los pasillos entre las células tienen el espacio justo para circular y maniobrar una carretilla, pero no cuenta con pasillo para peatones. Los trabajadores tendrán que acceder y salir de sus puestos atravesando otras células de secuenciado hasta llegar a los pasillos principales superior e inferior.

El principal elemento de manutención en los pasillos adyacentes a las células será la carretilla elevadora. Estas carretillas se relacionan con una elevada accidentalidad y se tienden a evitar siempre que sea posible. En este caso, el diseño de las células requiere del almacenaje en altura, no era posible.

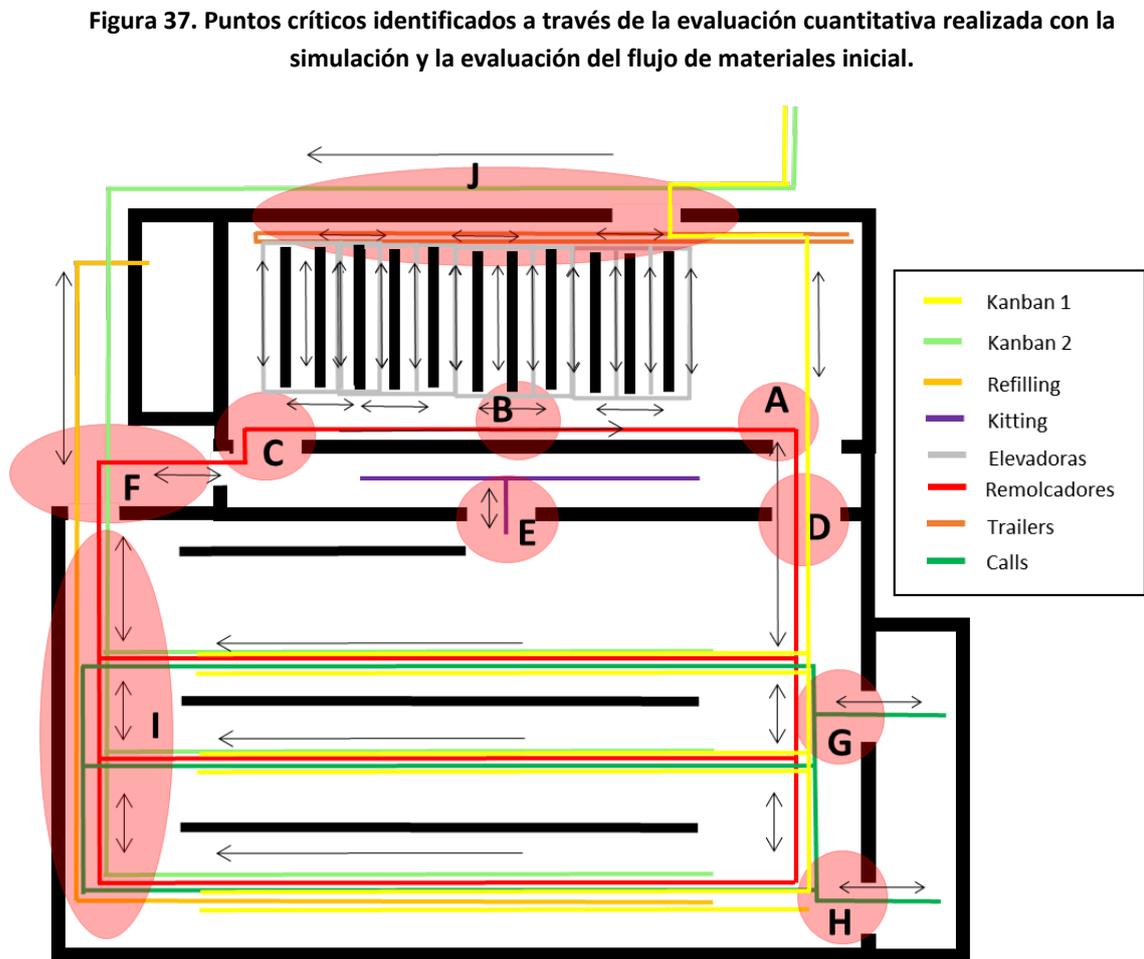
La falta de espacio en los pasillos y el volumen de movimientos obligará a que las carretillas esperen mientras una carretilla maniobra durante el suministro a una

célula. Esto genera tiempos de espera y podría aumentar el tiempo de ciclo del suministro de palés a las células.

También hay que considerar que se trata de células y pasillos estrechos en altura, en los que los operarios de las células y los carretilleros estarán prácticamente encerrados durante horas.

8.7.3 Identificar y documentar puntos críticos

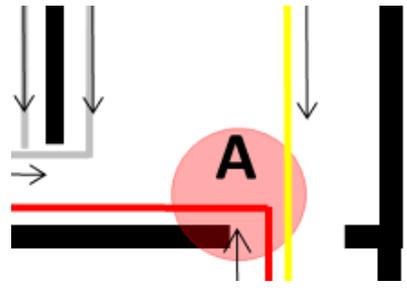
La Figura 37 representa cada uno de los diferentes flujos de materiales de las diversas políticas de suministro, el camino recorrido a lo largo de la planta, y en rojo se identifican qué puntos se consideran críticos por los resultados cuantitativos y cualitativos y motivo de una evaluación con mayor detalle.



Fuente: Elaboración propia.

Punto crítico A

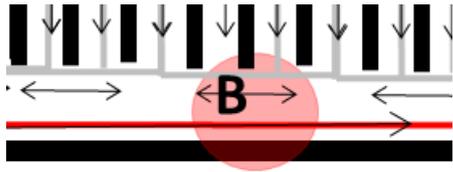
Tabla 40. Cantidad de movimientos generados por cada tipo de flujo en el punto crítico A.

Punto crítico A	Flujo	Intensidad horaria	S/mov
	Kanban 1	18,83	191,19
	Remolcadoras Trim llenas	109,60	32,85
	Remolcadoras Chasis llenas	42,23	85,24
	Cajas de cartón	28,29	127,24
	Total	199,15	18,07
Descripción de entorno			
<p>Este punto corresponde con el acceso sur este desde la planta de montaje final hasta la nueva instalación. Según la propuesta de diseño del interior de la nueva instalación, por este acceso pasarán las carretillas remolcadoras llevando 4 carros secuenciados por viaje. También hay movimiento de rutas Kanban desde una zona alejada de la fábrica, que cruzan la nueva instalación durante el suministro.</p>			
Problemas de seguridad			
<p>Los principales problemas de seguridad en este punto se deben a:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Existen 3 flujos con diferentes elementos de manutención. • Corresponde con un área de riesgo por la intersección entre flujos. • Contiene un giro en un acceso de una planta a otra donde, lo que reduce la visibilidad. • Existen un elevado número de movimientos por minuto. • Corresponde con una entrada bidireccional, ya que las rutas kanban vuelven por el mismo sitio. • Conviven peatones y elementos de manutención separados. 			

Fuente: Elaboración propia.

Punto crítico B

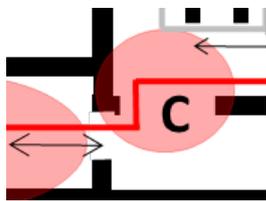
Tabla 41. Cantidad de movimientos generados por cada tipo de flujo en el punto crítico B.

Punto crítico B	Flujo	Intensidad horaria	S/mov
	Remolcadoras Trim llenas y vacías	219,20	16,42
	Remolcadoras Chasis llenas y vacías	84,46	42,62
	Remolcadoras Chasis llenas	42,23	85,24
	Cajas de cartón	28,29	127,24
	Elevadoras	28,29	127,24
	Total	402,47	8,94
Descripción del entorno			
<p>Este punto corresponde con el pasillo principal inferior de la nueva instalación. De acuerdo con el diseño propuesto, en este pasillo coinciden todas las carretillas remolcadoras que, o bien circulan libremente o paran a remolcar dejar carros vacíos y recoger carros llenos. También circularán carretillas elevadoras por la parte superior para cambiar de un pasillo de células a otro.</p>			
Principales problemas de seguridad			
<p>Los principales problemas de seguridad en este punto se deben:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Existen 3 flujos con diferentes elementos de manutención. • Contiene una elevada actividad logística de carga y descarga. • Corresponde con un área de riesgo por la intersección entre flujos. • Presenta un giro en el acceso de una planta a otra donde se reduce la visibilidad. • Tienen un elevado número de movimientos por minuto. 			

Fuente: Elaboración propia.

Punto crítico C

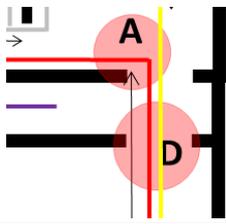
Tabla 42. Cantidad de movimientos generados por cada tipo de flujo en el punto crítico C.

Punto crítico C	Flujo	Intensidad horaria	S/mov
	Remolcadoras Trim vacías	109,60	32,85
	Remolcadoras chasis vacías	42,23	85,24
	Total	151,83	23,71
Descripción del entorno			
Este punto corresponde con el acceso sur oeste de la nueva instalación con la planta de montaje final. Por este acceso vuelven todas las carretillas remolcadoras vacías y se incorporan.			
Principales problemas de seguridad			
Los principales problemas de seguridad en este punto se deben: <ul style="list-style-type: none"> • Existen 2 flujos con diferentes elementos de mantenimiento. • Presenta un elevado número de movimientos en un acceso. • Contiene giros con poca visibilidad en el acceso. 			

Fuente: Elaboración propia.

Punto crítico D

Tabla 43. Cantidad de movimientos generados por cada tipo de flujo en el punto crítico D.

Punto crítico D	Flujo	Intensidad horaria	S/mov
	Kanban 1	18,83	191,19
	Remolcadoras Trim llenas	109,60	32,85
	Remolcadoras Chasis llenas	42,23	85,24
	Total	170,66	21,09
Descripción del entorno			
Este punto corresponde con el acceso sur este de la nueva instalación con la planta de montaje final. Por este acceso acceden todas las carretillas remolcadoras llenas hasta la planta de montaje. También vuelven las rutas kanban.			

Principales problemas de seguridad

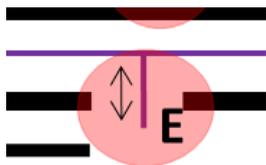
Los principales problemas de seguridad en este punto se deben:

- Existen 3 flujos con diferentes elementos de manutención.
- Presenta elevado número de movimientos en un acceso.
- Permite el acceso de una sola carretilla simultáneamente lo que puede generar un problema de congestión.
- Existe riesgo de colisión por ser un carril bidireccional.

Fuente: Elaboración propia.

Punto crítico E

Tabla 44. Cantidad de movimientos generados por cada tipo de flujo en el punto crítico E.

Punto crítico E	Flujo	Intensidad horaria	S/mov
	Kitting	80,49	44,73
	Total	80,49	44,73

Descripción del entorno

Este punto corresponde con un acceso norte desde una pequeña instalación con células de *kitting* hasta la planta de montaje final. Por este acceso solo acceden carretillas de reparto *kitting*.

Principales problemas de seguridad

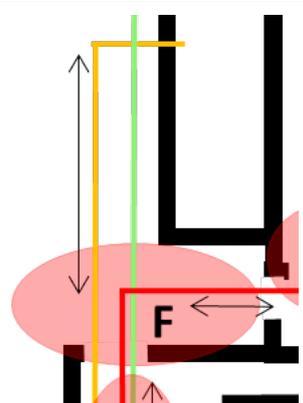
Los principales problemas de seguridad en este punto se deben:

- Permite el acceso de una carretilla simultáneamente lo que puede generar un problema de congestión.
- Existe riesgo de colisión por ser un carril bidireccional.
- Acceder a la planta teniendo que realizar giros para la incorporación al nuevo carril.

Fuente: Elaboración propia.

Punto crítico F

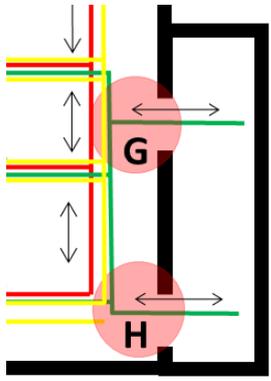
Tabla 45. Cantidad de movimientos generados por cada tipo de flujo en el punto crítico F.

Punto crítico F	Flujo	Intensidad horaria	S/mov
	Kanban 2	8,78	410,00
	<i>Refilling</i>	46,27	77,81
	Remolcadoras Trim vacías	109,60	32,85
	Remolcadoras chasis vacías	42,23	85,24
	Total	206,88	17,40
Descripción del entorno			
<p>Este punto corresponde con el acceso oeste a la planta de montaje final. Esta entrada es bidireccional y salen todas las carretillas remolcadoras vacías de vuelta a las células. También acceden rutas kanban y el flujo de <i>refilling</i>.</p>			
Principales problemas de seguridad			
<p>Los principales problemas de seguridad en este punto se deben:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 4 flujos diferentes. • Esta entrada a la planta solo permite el acceso de una carretilla simultáneamente lo que puede generar un problema de congestión. • Elevado número de movimientos. • El acceso es pequeño y no permite la maniobra de carretillas. • Existencia riesgo por colisión al ser un carril bidireccional. • Acceso con giros con baja visibilidad para la incorporación al nuevo carril. • Acceso al exterior de la fábrica con cambios en la iluminación y visibilidad de los conductores. 			

Fuente: Elaboración propia.

Punto crítico G – H

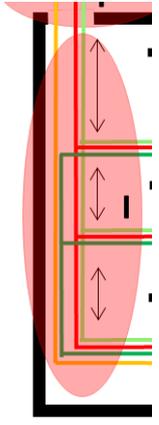
Tabla 46. Cantidad de movimientos generados por cada tipo de flujo en el punto crítico G y H.

Punto crítico G-H	Flujo	Intensidad horaria	S/mov
	Kanban 1	18,83	191,19
	Remolcadoras Trim llenas	219,20	16,42
	Call G	25,61	140,57
	Call H	29,41	122,39
	Otros	34,15	105,43
	Total	327,72	11
Descripción del entorno			
<p>Este punto corresponde el pasillo este de la planta de montaje por el que descienden todas las carretillas remolcadoras llenas y acceden a cada uno de los pasillos de la línea de montaje. También se incorporan carretillas con entregan de palé completo del flujo Call, la ruta Kanban 1, y otros movimientos residuales.</p>			
Principales problemas de seguridad			
<p>Los principales problemas de seguridad en este punto se deben:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 5 flujos diferentes. • Elevado número de movimientos. • El pasillo es pequeño y no permite la maniobra de carretillas. • Existencia de riesgo por colisión al ser un carril bidireccional. • Por este pasillo también circulan peatones. 			

Fuente: Elaboración propia.

Punto crítico I

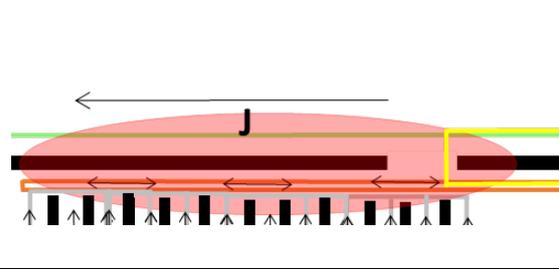
Tabla 47. Cantidad de movimientos generados por cada tipo de flujo en el punto crítico I.

Punto crítico I	Flujo	Intensidad horaria	S/mov
	Kanban 2	8,78	410,00
	Refilling	46,27	77,81
	Remolcadoras Trim vacías	109,60	32,85
	Remolcadoras Chasis llenas y vacías	84,46	42,62
	Call 1	62,34	57,75
	Call 2	7,32	492,00
	Otros	34,15	105,43
	Total	352,91	10,20
Descripción del entorno			
<p>Este punto corresponde con el pasillo principal oeste de la planta de montaje por la que acceden todas las carretillas remolcadoras a la zona de chasis y vuelven, tanto las de chasis como de trim vacías de nuevo a las células. Este pasillo también acoge todo el resto de flujos como son el call, refilling, y kanban, ya que salen de los pasillos de la línea y se incorporan a este para su retorno.</p>			
Principales problemas de seguridad			
<p>Los principales problemas de seguridad en este punto se deben a:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 7 flujos diferentes. • Existencia de riesgo por colisión al ser un carril bidireccional. • Por este pasillo también circulan peatones. • Este pasillo experimenta un gran volumen de movimientos, pero tiene un tamaño más grande respecto al resto de pasillos de la planta. • Existencia de un cruce entre los flujos de este pasillo y los que se provienen de los pasillos adyacentes a las líneas de montaje. • Hay una gran cantidad de personal que cruza a pie por este pasillo a lo largo del día. 			

Fuente: Elaboración propia.

Punto crítico J

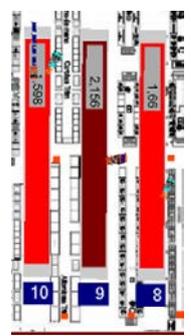
Tabla 48. Cantidad de movimientos generados por cada tipo de flujo en el punto crítico J.

Punto crítico J	Flujo	Intensidad horaria	S/mov
	Tráiler	35,37	101,79
	Carretillas elevadoras	28,29	127,24
	Kanban 1	18,83	191,19
	Total	82,48	43,64
Descripción del entorno			
<p>Este punto corresponde con el pasillo principal superior de la nueva planta para las células de secuenciado. Por este pasillo circulan tráileres llenos y vuelven vacíos hasta los muelles. También circulan carretillas elevadoras para girar entre pasillos y recoger los palés llenos de los tráileres y devolver los palés vacíos, y acceden la ruta kanban 1.</p>			
Principales problemas de seguridad			
<p>Los principales problemas de seguridad en este punto se deben:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 3 flujos con diferentes elementos de manutención. • Área de riesgo por la intersección entre flujos. • Giro con acceso de una planta a otra donde se reduce la visibilidad. • Pasillo bidireccional. 			

Fuente: Elaboración propia.

Punto crítico K

Tabla 49. Cantidad de movimientos generados por cada tipo de flujo en el punto crítico K.

Punto crítico k	Flujo	Intensidad horaria	Congestión promedio	Congestión máxima
	Carretillas elevadoras	28,29	2.15	11
Descripción de entorno				
Este punto corresponde con los pasillos adyacentes a las columnas de células de la nueva instalación. En ellos se encuentra la actividad de suministro de palés llenos a las células y el retorno de los vacíos a las TS2.				
Problemas de seguridad				
<p>Los principales problemas de seguridad en este punto son:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Los resultados de la simulación llegan a registrar una congestión máxima de hasta 11 carretillas simultáneamente en un pasillo. • Los 21 pasillos registran más de 5 carretillas de congestión máxima. • 6 pasillos presentan una congestión promedio de 1.5 carretillas a lo largo del día, lo que significa que estos pasillos siempre están ocupados con al menos una carretilla. • El diseño del sistema de suministro y de las células requiere que los pasillos no sean solo de tránsito, sino que estén enfocados a realizar actividades logísticas de manipulación en ellos. • Los pasillos no son tan anchos como para permitir el tránsito de carretillas mientras una realiza el suministro a la célula. • La elevada operativa y la elevada congestión aseguran que esos pasillos sufrirán cuellos de botella y atascos en varios momentos al día. 				

Fuente: Elaboración propia.

8.8 Fase 6: Discusión de los resultados

8.8.1 Comparar alternativas y validar diseño

La alternativa 1, Figura 33, fue la primera que se descartó por los resultados obtenidos para los medibles de congestión y, además, no distinguía entre zonas por operadores logísticos y destino. En un primer momento se quiso evaluar por si al dotar de mayor libertad al modelo se conseguían mejores resultados respecto del resto de alternativas. Los resultados de la simulación muestran que tiene una mayor cantidad de pasillos congestionados en comparación con las otras soluciones. En concreto tiene 6 pasillos con más de 3 carretillas simultáneamente durante las 24h de producción. En uno de los pasillos, la simulación en un momento dado del día registró 22 vehículos simultáneamente. En la práctica esto no hubiera ocurrido pues los carretilleros hubieran encontrado otras soluciones.

Las alternativas 2, 3 y 4, presentan valores similares (ver Figura 34, Figura 35, Figura 36). Las tres contienen 4-6 pasillos en los que se superar la circulación de 3 carretillas simultáneamente. También presentan 3-4 pasillos que registran una congestión máxima superior a 10 carretillas simultáneamente.

En base a la similitud en cuanto al tráfico de las diferentes alternativas, la gerencia decidió decantarse por la alternativa 3, cuya congestión promedio en los pasillos era ligeramente inferior. Además, al separar las células según su punto de destino, los metros recorridos al juntar carros en rutas de reparto se reducen respecto del resto. También permitía cierto margen de mejora futuro al mejorar las rutas de reparto de los carros secuenciados.

8.8.2 Proponer mejoras a la alternativa final para tratar de reducir el tráfico y aumentar la seguridad

De acuerdo con los resultados de la alternativa 3, dentro de la nueva instalación se identifican 3 puntos críticos. Los pasillos principales inferior (punto crítico B) y superior (punto crítico J) (recordar Tabla 45 y Tabla 52 respectivamente) y los pasillos adyacentes a las células, punto crítico K (ver Tabla 53). Se propusieron las siguientes recomendaciones (ver Tabla 55 y Tabla 62).

Punto crítico A

Tabla 50. Recomendaciones para el punto crítico A.

Recomendaciones
<ol style="list-style-type: none">1. Dejar una zona de paso e intersección entre pasillos ancho y con visibilidad.2. Establecer prioridad de paso a las rutas kanban y cajas de cartón por representar un menor número de movimientos y no presentar giros en su recorrido.3. Colocar espejos convexos para visualizar el tráfico en la intersección y giros.4. Diferenciar el carril de peatones del de carretillas.

Fuente: Elaboración propia.

Punto crítico B

Tabla 51. Recomendaciones para el punto crítico B.

Recomendaciones
<ol style="list-style-type: none">1. Diferenciar un carril de circulación para las carretillas remolcadoras llenas, una zona de parada y remolque para recoger y dejar los carros secuenciados y un carril de paso para las carretillas elevadoras.2. Establecer prioridad para las carretillas remolcadoras en el carril de circulación y extremar la precaución en el momento de incorporación de una remolcadora cargada desde la zona de carga/descarga.3. Colocar espejos convexos para visualizar el tráfico en la intersección de las carretillas elevadoras con las remolcadoras.4. Establecer prioridad para las carretillas remolcadoras en el carril de circulación y extremar la precaución en el momento de incorporación de una remolcadora cargada desde la zona de carga/descarga.

Fuente: Elaboración propia.

Punto crítico C

Tabla 52. Recomendaciones para el punto crítico C.

Recomendaciones
<ul style="list-style-type: none">- Implementar espejos convexos para los giros. Las carretillas remolcadoras son muy largas por los 4 remolques que llevan, luego en el caso de congestión y que existan carretillas paradas se debe tener una buena visibilidad.

Fuente: Elaboración propia.

Punto crítico D

Tabla 53. Recomendaciones para el punto crítico D.

Recomendaciones
<ul style="list-style-type: none">- Asegurar el tamaño del carril de circulación para ambos sentidos y la separación entre ellos.

Fuente: Elaboración propia.

Punto crítico E

Tabla 54. Recomendaciones para el punto crítico E.

Recomendaciones
<ul style="list-style-type: none">• Asegurar el tamaño del carril de circulación para ambos sentidos y la separación entre ellos.• Implementar espejos convexos para visualizar los giros.

Fuente: Elaboración propia.

Punto crítico F

Tabla 55. Recomendaciones para el punto crítico F.

Recomendaciones
<ul style="list-style-type: none">• Implementar medidas de circulación, como puede ser un semáforo para gestionar las entradas y las salidas, así como la prioridad de paso según la dirección de procedencia.• Implementar espejos convexos para visualizar los giros.• Comprobar una buena iluminación para evitar falta de visibilidad por cambios en la iluminación.

Fuente: Elaboración propia.

Punto crítico G-H

Tabla 56. Recomendaciones para el punto crítico G-H.

Recomendaciones
<ul style="list-style-type: none">• Diferenciar un carril de circulación para cada sentido y que estén correctamente señalizados.• Establecer prioridad de circulación y extremar la precaución en el momento de incorporación de una remolcadora cargada desde la zona de almacén call.

Fuente: Elaboración propia.

Punto crítico I

Tabla 57. Recomendaciones para el punto crítico I.

Recomendaciones
<ul style="list-style-type: none">• Diferenciar un carril de circulación para cada sentido y que estén correctamente señalizados.• Establecer prioridad de circulación y extremar la precaución en el momento de incorporación desde los pasillos adyacentes a la línea.

Fuente: Elaboración propia.

Punto crítico J

Tabla 58. Recomendaciones para el punto crítico J.

Recomendaciones
<ol style="list-style-type: none">1. Colocar espejos convexos para visualizar el tráfico en la intersección de los tráileres con las carretillas elevadoras y el acceso del kanban.2. Diferenciar un carril de circulación para los tráileres llenos y vacíos, la zona de TS2 y un carril de paso para las carretillas elevadoras.3. Separar en las TS2 la actividad de palés vacíos y llenos.

Fuente: Elaboración propia.

Punto crítico K

Tabla 59. Recomendaciones para el punto crítico K.

Recomendaciones
<ul style="list-style-type: none">- Traer a la nueva instalación solo aquellas células de secuenciado necesarias.- Dejar fuera de la nueva instalación aquellas células que generen un mayor número de movimientos diarios y llevarlas a otra instalación, para reducir las probabilidades de tráfico y accidentes.

Fuente: Elaboración propia.

Otras recomendaciones generales para la gestión del tráfico en la planta de montaje y de la nueva instalación:

- La propuesta inicial pretendía que todos los pasillos de la planta de montaje final fueran unidireccionales. Sin embargo, sería necesario mantener al menos uno de los pasillos bidireccional para facilitar el movimiento de las entregas secuenciadas y las rutas kanban.

- Dentro de la planta habría que añadir señales de tráfico en zonas de flujo mixto.
- En el punto crítico I, que presenta un mayor riesgo de congestión, habría que incorporarle semáforos que controlaran el flujo y las preferencias de circulación intersecciones.
- Para eliminar el tráfico de las tráileres y eliminar movimientos dentro de la planta, este se podría sustituir por una cinta transportadora desde los muelles.
- Las medidas de seguridad en los pasillos de la nueva instalación y en los pasillos de trim se deberían mejorar, revisando el estado de las marcas de separación de flujos.
- Definir la direccionalidad de los pasillos transversales de la nueva instalación para reducir los cruces y maniobras en ellos.
- Reducir la cantidad de células a trasladar dentro del edificio para reducir el volumen de actividad en este. Seleccionar aquellas células que mayor volumen de movimientos diarios generen.
- Realizar la implantación poco a poco para evaluar el progreso y el tráfico dentro de la instalación.

8.8.3 Plantear una posible monitorización del entorno después de una implantación

Durante el proceso de implantación se recomendó comenzar el proceso poco a poco por secciones. Esto permitía evaluar por zonas el volumen de actividad y el tráfico generado in situ y valorar la continuidad de migración del resto de células.

Para ello, se propone mantener el modelo de simulación y evaluar algunas de las recomendaciones como no migrar aquellas células con mayor volumen de movimientos diarios.

8.9 Conclusión

Este capítulo presenta un caso de estudio real sobre el suministro a una línea de montaje de automóviles con mezcla de modelos. En un primer momento el caso requiere localizar 70 células de secuenciación en una instalación significativamente más pequeña de donde hasta ahora se venía realizando la actividad. Estas células llevan asociada una elevada actividad logística, ya que diariamente generan 10.000 carros secuenciados y para ello es necesario abastecerlas diariamente con 6.000 palés de diversas referencias.

El caso planteaba a la dirección de la planta diversos problemas como son el localizar y asignar las células dentro de la nueva instalación, diseñar el sistema de suministro y un flujo de material seguro y eficiente a lo largo de esta. La principal preocupación era la seguridad en la planta, ya que toda la logística de entrada y salida a las células generaba cientos de movimientos de elementos de manutención en los pasillos adyacentes a estas y en la que convivían diversos elementos de manutención y operarios en un espacio reducido. Dada la complejidad logística de la nueva propuesta de ubicación de las células, se requirió la intervención de personal externo para ayudar en el proceso de toma de decisiones.

Inicialmente se enfrentó el caso con una evaluación general del sistema de suministro a la línea de montaje final, lo que ha permitido conocer cómo impactaría la nueva actividad a todo el sistema de suministro y proponer un diseño del interior de la instalación. De esta evaluación se aprecia que el verdadero problema del tráfico y seguridad se encuentra dentro de la nueva instalación y, por lo tanto, requerirá de una asignación adecuada de las células y una evaluación correspondiente.

Para asignar las células según el diseño de la instalación, se utilizó un modelo de optimización combinatoria. El objetivo fue minimizar la intensidad máxima en los pasillos y equilibrar la actividad a lo largo de la planta. Las soluciones para cada una de las cuatro alternativas se mejoraron con la aplicación de dos heurísticas.

La variedad de soluciones iniciales y las heurísticas de búsqueda local aplicadas han permitido obtener una gran variedad de soluciones para analizar. Sin embargo, no todas las combinaciones de criterios de ordenación y estrategias de asignación proporcionaron soluciones interesantes. De hecho, la aplicación consecutiva de la búsqueda local con el intercambio de células y columnas no representa una mejora considerable. La aplicación del intercambio de células ya logra, en promedio, una reducción del valor máximo registrado.

A continuación, se evaluó el tráfico y seguridad. Para ello fue necesario construir un modelo de simulación para evaluar el efecto dinámico de las operaciones logísticas y del tráfico en cada una de las cuatro alternativas. Construir el modelo de simulación con un enfoque en capas permitió, durante la fase de modelado y diseño, crear un sistema de suministro más realista, donde el flujo de información se desacopla del flujo de materiales. El modelo de simulación ha registrado el tráfico existente en el sistema.

La representación visual del modelo proporciona una mejor comprensión del proceso de suministro completo para los gerentes, lo que ayuda a identificar aquellas ineficiencias que no se consideraron durante la primera evaluación del diseño preliminar y durante la optimización de la asignación de células. El modelo de simulación ha sido validado con las estimaciones estáticas previamente obtenidas.

Los elementos visuales *andon* han favorecido la comprensión de los resultados para el usuario final, en este caso el cliente. En general, el cliente no estaba familiarizado con la interfaz del software de simulación. Representar la actividad en los pasillos con medibles y rangos de colores previamente conocidos permiten comparar la situación del tráfico futuro con la actividad existente en otras partes de la fábrica. Esta comparativa les ha permitido hacerse una idea de qué se puede esperar con el nuevo diseño. Este modo de presentación se considera una de las mejores lecciones aprendidas del caso de estudio.

Gracias a los resultados de la simulación, se ha podido proporcionar información relevante para el proceso de toma de decisiones. La simulación proporciona no solo estimaciones promedio, que son relevantes para los ingenieros de diseño de instalaciones, sino también los peores casos posibles, que fueron uno de los mayores intereses de los gerentes que dirigen la operativa diaria de la planta y los cuales deben asegurar el suministro a línea.

Aunque la cantidad de movimientos y el tráfico en algunas áreas era inevitable debido a la demanda diaria requerida, se propusieron varias recomendaciones cualitativas para gestionar y asegurar el tráfico en la planta durante la implantación. El cliente decidió asignar las células de acuerdo con la alternativa recomendada, sin embargo, se mostró reacio a aceptar algunas de las recomendaciones, como el hecho de no ubicar todas las células dentro de la instalación.

La implementación finalmente comenzó con dos columnas de células como prueba piloto y continuó gradualmente con el resto de las células. Durante este proceso, y viendo la complejidad logística y el volumen, el cliente valoró de nuevo las recomendaciones realizadas y entendió la necesidad de mover algunas de las células que tenían previsto migrar a esa instalación, a otra instalación.

En definitiva, la aplicación de la metodología ha permitido de una manera ordenada, converger a una propuesta de diseño de la instalación en la que el tráfico y la seguridad asociada al flujo de material han sido considerados como principal objetivo.

9 CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Esta tesis tiene como objetivo principal investigar la creciente complejidad que ha sufrido la logística interna de las plantas de montaje de automóviles en los últimos años. Esta se debe a la cantidad de opciones de personalización que se les ofrecen a los clientes finales y que, por consiguiente, conlleva el aumento de la variedad de referencias a disponer y gestionar en las fábricas.

Cabe destacar que, en general, las líneas de montaje se construyeron en momentos en los que esta variedad de referencias era limitada y los requisitos de espacio disponible junto a la línea para su almacenamiento y posterior ensamblado en el vehículo por parte de los operarios eran inferiores.

A lo largo de la tesis se ha tratado de dar respuesta a las preguntas de investigación siguiendo un hilo conductor distribuido en siete capítulos de contenido que proporcionan al lector una visión actual de la logística de aprovisionamiento a líneas de montaje. Esta se ha documentado analizando simultáneamente la realidad industrial de las fábricas a través de proyectos reales y todo ello basado en literatura científica. Gracias a ambas fuentes, en esta tesis se ha propuesto una metodología de evaluación validada a diversos casos reales.

En el capítulo dos, se ha presentado una visión general de la realidad industrial actual y de las futuras tendencias que se esperan en el futuro para el sector del automóvil. Los resultados de la revisión de diversos informes y trabajos identifican que la demanda de automóviles decaerá, cambiando así el paradigma de producción hasta ahora conocido. La fabricación tenderá a ser multimodelo con una personalización de producto cada vez mayor y una reposición de nuevos modelos anualmente.

Esto conlleva en la actualidad y en el futuro cambios en la logística interna al tener que gestionar más decenas de miles de referencias. Al haberse multiplicado la cantidad de referencias a gestionar en la planta y a almacenar junto a la línea, la logística en las fábricas ha evolucionado implementando nuevos sistemas de suministro que permitan adecuarse a las características de las referencias en cuanto a tamaño, variedad y rotación entre otros. De este modo, en el capítulo dos también se presenta de manera detallada el proceso completo de la logística y los principales sistemas de suministro utilizados en la actualidad en las fábricas.

En el capítulo tres de la tesis se ha realizado una revisión sistemática de la literatura sobre el suministro a las líneas de montaje de automóviles. De los 1495 resultados

obtenidos de la primera búsqueda, se seleccionaron 87 artículos que específicamente trataran alguno de los problemas de decisión asociados a una de las etapas de la logística interna de plantas de montaje de automóviles. Los artículos finalmente seleccionados han sido clasificados según una taxonomía propuesta en el capítulo, la cual presenta las diferentes etapas dentro del suministro en planta y dentro de cada una de ellas, los principales problemas de decisión que pueden surgir. Para cada una de estas etapas se ha dedicado un apartado donde en primer lugar se presentan las diferentes operaciones realizadas en ella y, a continuación, los artículos seleccionados que tratan alguna de esas operaciones. Al final de cada apartado, se propone una tabla resumen con todos los artículos. Las tablas identifican de cada uno de ellos el problema o problemas de decisión tratados, la propuesta de los autores, el objetivo del trabajo y el método de resolución utilizado. Al final del capítulo dos, se ha realizado una discusión de los resultados de búsqueda obtenidos con tablas resumen para sintetizar mejor la información.

El capítulo tres ha servido para conocer qué etapas son las más trabajadas en la literatura y qué oportunidades presenta la literatura. Sin embargo, entre los trabajos vistos, no se han encontrado que traten el exceso de material asociado a los elementos de manutención, que es a la línea un tema principal de investigación, aunque algunos sí que lo citan como una preocupación real en las fábricas que afecta a la seguridad y eficiencia del suministro.

Con el capítulo cuatro, se ha querido dar respuesta a la falta de literatura sobre el tráfico y seguridad anteriormente citado. Para ello, se ha realizado una revisión comprensiva de la literatura sobre el tráfico, sobre la seguridad en planta y sobre la simulación por eventos discretos como herramienta de trabajo. Los artículos citados en el capítulo tres que sí han tratado este tema de manera residual, se han utilizado como punto de partida.

En cuanto al tráfico, se ha presentado cada uno de los trabajos seleccionados y finalmente propuesto una tabla que recoge la información más reseñable de cada artículo, como qué problema ven sobre el tráfico, medibles utilizados, herramientas de resolución y el entorno de aplicación. Es último resulta de interés ya que no ha sido posible focalizarlo únicamente en el automóvil dada la escasez de resultados.

La seguridad se ha trabajado de manera similar, donde se ha visto que las principales investigaciones tratan la seguridad debido a las características de los elementos de manutención, a la formación de los conductores, a los problemas durante el suministro, y también aquellos que proponen o identifican factores cualitativos que

interfieren en la seguridad. En este caso, la tabla recoge la principal preocupación de la seguridad de los elementos de manutención, las consecuencias de estos en las operaciones de la planta, la propuesta de los autores y la industria de aplicación.

La revisión sobre la simulación por eventos discretos se ha realizado para profundizar en el conocimiento y aplicación en la literatura de esta herramienta. En este caso la simulación por eventos discretos permite evaluar el tráfico de movimiento de material en entornos de producción considerando la dinámica y estocasticidad que caracterizan a la logística interna a líneas de montaje. Esta revisión incluye información sobre qué es y para qué se utiliza la simulación en estos casos y también los diversos enfoques de simulación para facilitar el modelado de sistemas complejos como son los de suministro. Dada la naturaleza estratégica de algunos problemas de decisión a tratar en la logística interna, se revisa la combinación de la simulación junto con herramientas de optimización. A partir de las revisiones realizadas, para concluir el capítulo se identifica los factores necesarios considerar durante el diseño y evaluación de los sistemas de suministro de material.

El capítulo cinco presenta la propuesta de metodología de evaluación de la seguridad y tráfico de la logística interna a líneas de montaje. Esta metodología surge de un proceso iterativo de *action research* en el que se enfrentaron varios casos reales sobre esta temática y que se han presentado en los capítulos posteriores. Para ello, se presenta una propuesta de herramientas cuantitativas, para estimar el tráfico con ayuda de medibles basados en la ingeniería del tráfico, y también otra propuesta de herramientas cualitativas para evaluar la seguridad. Ambas propuestas se basan en la literatura presentada en el capítulo cuatro.

La metodología consta de 6 fases, una fase preliminar donde se define el alcance del caso, se forma el equipo, se recoge la documentación necesaria, se realiza una estimación estática previa para conocer el sistema. Si fuera necesario se propone una segunda etapa para proponer y optimizar alternativas de diseños.

A continuación, en una tercera fase, se estima el tráfico con ayuda de la simulación por eventos discretos. Para ello, es necesario realizar el modelo y definir e implementar qué medibles resultarán de interés. El uso de los elementos *andon* ayudarán a visualizar y representar los valores de los medibles del tráfico. También se pueden simular otros medibles para conocer la eficiencia del modelo si fueran necesarios.

La seguridad se estimará con ayuda de una herramienta de auditoría en la tercera fase de la metodología. Esta herramienta consta de 44 preguntas distribuidas en 4 categorías denominadas (1) entorno de trabajo, (2) tareas de trabajo, equipos y políticas, (3) seguridad del personal de trabajo y (4) elementos de mantenimiento.

En la cuarta fase, con toda la información del modelo de simulación de las preguntas de auditoría, se evaluará el sistema de suministro como tal. Se identificarán los principales puntos críticos que sea conveniente estudiar con mayor nivel de detalle. Para ello, se propone el uso de una tabla que recoge toda esta información para cada uno de los puntos seleccionados. Esta evaluación servirá para validar los diseños y alternativas.

Finalmente, en la quinta y última fase de la metodología, se discutirán los resultados de la alternativa seleccionada o del diseño inicial a evaluar y se propondrán medidas concretas para tratar de mejorar aquellos tramos donde el tráfico o el diseño no se puedan cambiar.

Una vez vista toda la literatura relacionada y presentada la metodología de evaluación, se proponen tres casos de estudio en los que se ha aplicado dicha metodología. El primer caso de estudio se recoge en el capítulo seis y corresponde con un problema estratégico de suministro de material desde almacenes alejados respecto a su punto de consumo en la línea. Para ello se propone un modelo matemático para apoyar el rediseño de la logística interna, así como decidir la asignación de los proveedores a los muelles de descarga y de las referencias a los almacenes existentes y también el modo de suministro en cada etapa de suministro. El objetivo es minimizar el tiempo total requerido para manejar la demanda diaria de la planta se minimice.

Los resultados del modelo presentan una solución mejor respecto de la situación actual de entre un 20-30%. El modelo constituye una herramienta muy útil para los gerentes de logística, ya que permite evaluar diferentes escenarios estratégicos y anticipar su impacto en el rendimiento del sistema. En este caso de estudio, no fue necesario aplicar la metodología de evaluación propuesta ya que se trataba de un caso estratégico donde no se llega al nivel de detalle acerca de lo que ocurre en cada punto de la planta. Sin embargo, durante este proyecto sí que se aprendió que las condiciones meteorológicas influyen en el diseño de suministro. La planta en cuestión trabaja en condiciones extremas tanto en invierno (-30º) como en verano (+40º). La planta tiende a modificar las rutas de desplazamiento, lo que supone una

modificación en la cantidad de personal requerida, que justifica no sólo la ausencia de un estándar, sino la propia incertidumbre de los datos.

El segundo caso de estudio se recoge en el capítulo siete y evalúa un caso de estudio sobre la logística de aprovisionamiento a una línea de montaje con mezcla de modelos. El caso resalta los problemas de tráfico generados por los elementos de mantenimiento en los pasillos de las plantas de montaje. En este caso sí que se aplicó la metodología completa y se describe fase a fase cada una de las actividades realizadas. Este caso de estudio saca a la luz la real necesidad de gestionar el tráfico de los elementos de mantenimiento en las líneas de montaje multimodelo actuales. Como herramienta de evaluación se utilizó la simulación por eventos discretos y la herramienta de evaluación cualitativa de la metodología. Gracias a la evaluación fue posible proponer alternativas de mejora tanto en el diseño de las instalaciones como en la gestión, se propusieron medidas de reducción del tráfico y aumento de las condiciones de seguridad para los trabajadores y la producción.

Finalmente, el tercer y último caso de estudio, capítulo ocho, recoge una situación que surge tras aplicar una de las propuestas de mejora del caso de estudio anterior, donde, para mejorar la eficiencia del suministro se decide acercar unas 70 células de montaje a una ubicación más próxima al punto de consumo en la línea de montaje. Estas células llevan asociada una elevada actividad logística, ya que diariamente generan alrededor de 10.000 carros secuenciados y para ello es necesario abastecerlas diariamente con cerca de 6.000 unidades de carga de diversas referencias distintas. Dada la gran actividad logística a trasladar e implementar en una instalación inferior a donde se encontraban inicialmente, surge la necesidad de evaluar el tráfico y la seguridad del sistema de suministro.

Para asignar las células dentro de la nueva instalación, se utilizó un modelo de optimización combinatoria de donde se obtuvieron 4 alternativas de diseño. El objetivo era minimizar la intensidad máxima en los pasillos y equilibrar la actividad a lo largo de la planta. A continuación, y siguiendo la metodología, se evaluó el tráfico con un modelo de simulación para evaluar el efecto dinámico de las operaciones logísticas y del tráfico en cada una de las cuatro alternativas, lo cual permitió rechazar aquellas propuestas que no fueran consideradas apropiadas según el tráfico que estimado. Finalmente se aplicó el cuestionario cualitativo para evaluar la seguridad general del sistema.

Tal y como se ha visto a lo largo de la tesis, el problema de la seguridad y del tráfico de los elementos de mantenimiento es una realidad industrial y, la aplicación de la

metodología, ha permitido de una manera ordenada, validarla y converger hacia propuestas de diseño de instalaciones y de sistemas de suministro. Gracias a ello, el tráfico y la seguridad asociada al flujo de material han sido considerados como principal objetivo, obteniéndose como resultado, diseños eficientes y seguros. Estas propiedades son requeridas en los entornos de trabajo y, por lo tanto, se espera que se puedan seguir llevando a la práctica en un futuro próximo en más instalaciones.

Como continuación a esta tesis se proponen varias líneas futuras de investigación relacionadas con el aumento de la eficiencia de los sistemas de suministro, el tráfico y seguridad en planta y el modelado de los problemas.

En primer lugar, la recepción de material para líneas de montaje se ha visto que es un tema poco tratado en la literatura pese a que plantea grandes preguntas de investigación. De este modo, una de las futuras líneas de trabajo sería plantear modelos concretos sobre esta etapa de suministro con problemas de decisión como la localización de muelles, programación de ventanas horarias, o estimación de flotas entre otros, e incluso combinarlos con otras etapas de suministro previas o posteriores, como las entregas desde los proveedores (logística externa) o la descarga y transporte a los almacenes dentro de la propia fábrica (logística interna).

Otro tema poco tratado en la literatura, corresponde a la asignación y secuenciación de las entregas a líneas. El suministro desde almacenes y células se podría tratar de mejorar si la secuencia de recogida de los productos a entregar en la línea se hiciera acorde a la ruta de reparto en la línea. De este modo se podría contribuir a mejorar no solo la eficiencia en el transporte sino también la gestión del tráfico al tener un mayor control de los repartos en cada momento.

El problema de equilibrado de líneas ha sido ampliamente estudiado en la literatura. Durante la revisión de la misma, se encontraron algunos trabajos que combinaban simultáneamente el problema del equilibrado de la línea y de la eficiencia del sistema de suministro. Este problema se considera muy interesante desde el punto de vista estratégico de las fábricas, ya que las líneas de montaje son difíciles de modificar, por lo que normalmente se ha de adaptar el diseño existente a las nuevas circunstancias de las fábricas. Además, la revisión sistemática también ha sacado a la luz que el problema de la presentación de las referencias en la línea ha sido poco tratado desde el punto de vista del suministro. Normalmente este problema se asocia a la ergonomía del puesto de trabajo e influye en el diseño las estaciones. Por otra parte, dada la tendencia multimodelo, se propone como futura línea de investigación trabajar en modelos que combinen la decisión de decidir si una línea

admite o no determinados modelos de automóviles, y definir cómo asignar las estaciones, cómo combinarlas con modelos ya existentes y sobre todo, considerar el espacio disponible junto a las estaciones para ubicar las referencias a la hora de tomar las decisiones de equilibrio de la línea.

En los modelos de optimización utilizados en esta tesis, la estimación de la eficiencia general del sistema y posible estimación de recursos se ha realizado por la vía de minimizar los tiempos totales del proceso por tratarse de un problema de carácter estratégico o aproximado, y por ser la forma más extendida dentro de la literatura. Sin embargo, una posible continuación del trabajo sería comparar dichas estimaciones realizadas en la tesis con unas en las que se compute el tiempo de operación requerido en cada etapa por operario, es decir, estimar el tiempo de personal necesario en lugar de tiempo general. Una comparación entre ambas podría aportar una visión más realista al modelo aquí propuesto y comprobar el grado de desviación de trabajar en tiempos totales o de personas.

Otra línea de trabajo sería el estudiar el impacto del tráfico en planta considerando en los modelos la topología de la red de pasillos y de las rutas de envío. Comparar varios modelos en los que el sentido de los pasillos, ubicación de los actuales o considerar el abrir nuevos, así como las rutas de reparto generados de acuerdo a los pasillos podría aportar una visión de cómo de relevante es este tema en la eficiencia. Normalmente los pasillos vienen generalmente predefinidos con el diseño de la fábrica, pero con estos modelos, se podría considerar la topología de los pasillos durante el diseño, para analizar si aporta o no mejoras considerables desde el punto de vista de la seguridad y el tráfico a los sistemas de suministro.

El aprovisionamiento a la línea de montaje de automóviles ha tomado mucha relevancia en la revisión de la decisión de las políticas de suministro, sobre todo, considerando la necesidad de ayudar ante problemas como es la falta de espacio junto a la línea, la elevada variedad de componentes y el tener que trabajar siguiendo la secuencia de flujo de automóviles. Decidir qué política aplicar a cada tipo de referencia se vuelve una tarea esencial en la toma de decisiones en plantas de montaje reales. Es por ello que, como futura línea de trabajo, se propone combinar esta decisión con parámetros de estimación del tráfico como es la intensidad en ciertos tramos o la congestión resultante del tiempo de operación en algunos pasillos entre otros. Otra posible ampliación sería combinar la decisión de elección del tipo de política de suministro junto la del equilibrio de líneas propuesta más arriba.

Finalmente, aproximarse al problema de cómo generar mejores soluciones para mejorar el suministro a líneas de montaje. Para ello se propone combinar de nuevo la optimización con los modelos de simulación, no solo para evaluar el correspondiente flujo de material y las operaciones asociadas, sino utilizar la solución de la simulación de manera recursiva, es decir, obtener la solución de valores realistas de ciertos parámetros como los tiempos de transporte entre nodos, tiempos de operación, etc. y utilizarlos como nuevos parámetros de entrada para el modelo de optimización en el caso de que hubiera discrepancias significativas entre los parámetros obtenidos en la simulación y los utilizados inicialmente en el modelo de optimización.

10 PUBLICACIONES FRUTO DE ESTA TESIS

Durante el desarrollo de esta tesis se han llevado a cabo varias aportaciones, cuatro de ellas en congresos y 3 artículos en revistas indexadas. El último de los artículos se encuentra aceptado y en la última fase para su publicación en los próximos meses. Además de estas aportaciones, se tienen preparados otros artículos con la revisión sistemática de la literatura del capítulo 3 y otro con la metodología propuesta que todavía se encuentran en fase de maquetación a la espera de ser enviados para su revisión en una revista.

Publicaciones en congresos

- Saez-Mas, A., Garcia-sabater, J. J., Morant-Llorca, J., & Garcia-Sabater, J. P. (2017). Sequencing Cells Layout to reduce Traffic Congestion. 11th International Conference on Industrial Engineering and Operations Management XXI Congreso de Ingeniería de Organización.
- Garcia-Sabater, J. J., Saez Mas, A., Morant Llorca, J., & Garcia-Sabater, J. P. (2017). Placement of cells in a product sequencing facility for an assembly line. 11th International Conference on Industrial Engineering and Operations Management XXI Congreso de Ingeniería de Organización.
- Reina-Megias, J., Garcia-Sabater, J. P., Ruiz, A., & Saez-Mas, A. (2018). Planning of storage space and material handling alternatives to supply an Assembly Line. 12th International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management XXII Congreso de Ingeniería de Organización, 1–9.
- Saez-Mas, A., Ruiz, A., Garcia-Sabater, J. P., & Garcia-Sabater, J. J. (2018). Redesign of the in-plant logistics for a production facility. 12th International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management XXII Congreso de Ingeniería de Organización, 1–9.

Artículos en revistas indexadas JCR

- Saez-Mas, A., Garcia-Sabater, J. J., Garcia-Sabater, J. P., y Maheut, J. (2018). Hybrid approach of discrete event simulation integrated with location search algorithm in a cells assignment problem: a case study. *Central European Journal of Operations Research*, 1–18. DOI: 10.1007/s10100-018-0548-5
- Saez-Mas, A., Garcia-Sabater, J. P., y Morant-Llorca, J. (2018). Using 4-Layer architecture to simulate product and information flows in manufacturing. *International Journal of Simulation Modelling*, 17(1), 30–41. DOI: 10.2507/IJSIMM17(1)408

- Saez-mas, A., Garcia-sabater, J. P., Garcia-sabater, J. J., & Ruiz, A. (In press). Redesigning the in-plant supply logistics: a case study. *Computers & Industrial Engineering*. DOI: 10.1016/j.cie.2020.106422.

Artículos en revistas indexadas en SCOPUS

- Sáez Más, A., García Sabater, J. P., Morant Llorca, J., & Maheut, J. (2016a). Data-driven simulation methodology using DES 4-layer architecture. *Working Papers on Operations Management*, 7(1), 22–30. DOI: 10.4995/wpom.v7i1.4727
- Saez Mas, A., Garcia-Sabater, J. P., Morant Llorca, J., Maheut, J., Sáez Más, A., García Sabater, J. P., ... Maheut, J. (2016). Assembly plant simulation to support decision-making on Layout Design considering safety issues. A case study. *Working Papers on Operations Management*, 7(2), 64–88. DOI: 10.4995/wpom.v7i2.4721
- Sáez Más, A., García Sabater (2016). Protocol: Material flow risk evaluation for layout design. *Working Papers on Operations Management*, 7(2), 43–63. DOI: 10.4995/wpom.v7i2.5710

11 ANEXOS

11.1 Capítulo 5: Simulación en 4 capas

11.1.1 Enfoque de simulación en 4 capas

Después de probar varios enfoques para resolver el problema de analizar el flujo de material que alimenta a las líneas de ensamblaje, surgió la necesidad de separar el flujo de material (vehículos y camiones) del flujo de información. Sin embargo, dada la complejidad e importancia de los sistemas de manejo de materiales (MHS) por su impacto en el rendimiento del sistema de producción (Negahban y Smith, 2014), es necesario ir un paso más allá con la simulación data-driven.

Con este propósito, en esta tesis se sugiere la concepción de los modelos de simulación como una arquitectura de 4 capas (es decir, separar la capa de la red, la lógica, la base de datos y la parte visual). Al hacerlo, no solo se abstraen los datos del modelo para permitir el manejo de un mayor volumen de datos, sino que también se proponen distinguir los procesos lógicos (aquellos que toman decisiones) de los procesos físicos (aquellos que "agregan valor") en modelado.

Este enfoque busca descomponer el problema para lograr un mejor diseño, enfrentando de manera independiente cada capa y combinarlas entre sí. Esta forma de modelado es adecuada para problemas complejos como el (re) diseño de layout, la gestión del flujo de material o el elevado volumen de datos a manejar, y favorece la detección de problemas que de otra manera podrían haberse pasado por alto. También permite un crecimiento modular del modelo de simulación, lo que nos favorece realizar cambios en las capas sin alterar todo el modelo de simulación, además de reutilizar las capas en futuros modelos de simulación.

En general, en los modelos de simulación por eventos discretos, la toma de decisiones que se dispara (o se activa) por los *triggers* está integrada en los diferentes elementos que describen el sistema. De esta manera, la complejidad de la toma de decisiones está limitada por la capacidad de programar rutinas complejas.

Como es necesario incorporar elementos móviles en la simulación, surge la necesidad de generar un sistema que gobierne de manera autónoma el flujo de materiales, por ejemplo, el movimiento de montacargas en una planta o un almacén. Lo mismo se aplica cuando los procesos de secuenciación de unidades se

complican por la creciente complejidad de la gama de productos a secuenciar o los caminos que deben seguir.

En la práctica, la necesidad de controlar el flujo de material conlleva como mínimo que haya dos operaciones paralelas de sistemas de planificación y control, una para productos y otra para los elementos de manipulación que no están conectadas entre sí. En términos de construcción de modelos de simulación, es difícil considerar los aspectos discutidos anteriormente, por lo que surge la necesidad de separar el problema en capas para abordar todo el problema.

El concepto de 4 capas es relevante en este contexto, ya que distingue la recopilación y el almacenamiento de la información de cada dominio y también separa los principales módulos del modelo. En la arquitectura propuesta, se utilizan cuatro bloques para construir el modelo: red, lógica, base de datos y visual. La idea de las capas fue sugerida por (Saez-Mas, Garcia-Sabater, Morant-Llorca, y Maheut, 2016). A continuación, se consolida la idea y analizan las ventajas de usar un modelo de 4 capas. Las cuatro capas propuestas son:

- Capa Red. Esta capa incluye lo que para la mayoría de los usuarios es el "Modelo de simulación". Incluye las máquinas, buffers, caminos y productos a transformar. Explícitamente, se eliminan los datos que controlan el rendimiento, las lógicas que toman decisiones y, si es posible, la representación externa. Aislar esta capa de otras nos permite concentrarnos en el diseño y la estructura del flujo, lo que facilita el uso de partes de simulación en diferentes contextos.
- Capa Lógica. Esta capa incluye procesos de toma de decisiones. Los diferentes procedimientos se programan como autónomos utilizando paquetes estándar. Estos procedimientos pueden activar otros procedimientos de decisión, o incluso elementos en la capa de red. En una fábrica habitual, esta capa representaría los sistemas de control y planificación de operaciones, que incluirían los procesos de planificación y secuenciación y el sistema de control del equipo de manejo de materiales (MHE).
- Capa de Base de Datos. En la mayoría de las configuraciones operativas, puede ayudar considerar a los ERP como una base de datos transaccional que contiene toda la información necesaria para realizar los procesos. La capa de la base de datos sigue esta idea. La capa de base de datos es una base de datos que alimenta las simulaciones con los datos necesarios para realizar

actividades y tomar decisiones. La información almacenada no solo son los parámetros necesarios para la capa de red, sino también los resultados de los cálculos y los indicadores de rendimiento. Pero construir la capa de base de datos por separado requiere diseñar el sistema cuidadosamente para evitar incluir datos en las capas lógica y de red.

- Capa Visual. La capa visual se incluye en la mayoría de los paquetes de simulación con la capa de red, y facilita la comunicación con los usuarios. Sin embargo, diferentes usuarios en la organización principal pueden requerir ayudas visuales distintas. Una característica específica de nuestra propuesta incluye pizarras y otros elementos coloreados de *andon* en la simulación. Basados en Wallace (Wallace, 2008), los elementos de *andon* representan estados o problemas y sus ubicaciones, lo que brinda a los ingenieros la oportunidad de intervenir y resolverlos antes de que se salga de su control. Los elementos *andon* de color permiten que las máquinas informen sobre su estado, pero también pueden ilustrar la congestión en un pasillo determinado, el estado de un almacén o el tamaño de la cola en la estación de camiones de remolque.

La capa lógica junto con la capa de base de datos, configura el sistema de información de una configuración real. Mientras tanto, las capas de red y Visual están relacionadas con los sistemas físicos. Se puede concluir que la información y los flujos de material con esta configuración están representados explícitamente para permitir una mejor comprensión de los procesos reales.

11.1.2 Arquitectura de simulación en 4 capas

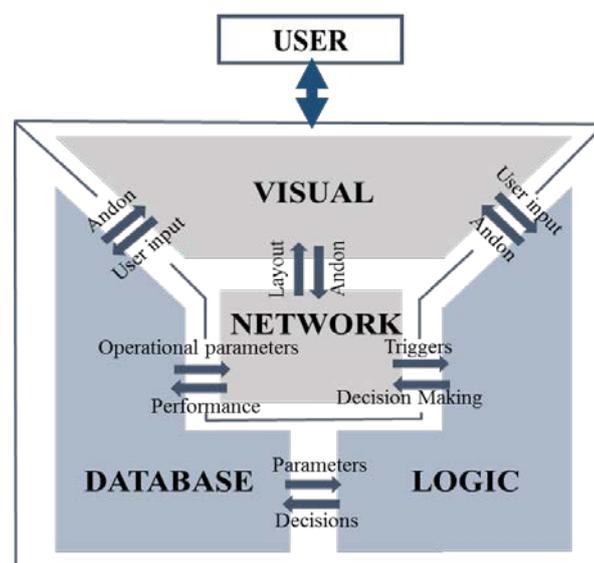
La base de la simulación es que en esta arquitectura las capas están fuertemente interconectadas. La división explícita de capas requiere la planificación de los procesos de simulación y los enlaces entre las capas. La Figura 38 ilustra una representación de la estructura y sus conexiones, que se presentan a continuación.

La capa de red realiza actividades físicas; por ejemplo, las máquinas transforman los productos a una velocidad que se define internamente en el modelo mediante parámetros, que también pueden almacenarse en la capa de base de datos, lo que facilita la experimentación de escenarios. Por el contrario, la mayoría de los resultados e indicadores de la simulación se almacenan en el modelo. Si se transfiere a la Base de datos, esta información puede usarse para tomar decisiones basadas en la situación real de la planta.

En la mayoría de los paquetes de simulación, la capa de red es capaz de tomar decisiones de programación, como, por ejemplo, a dónde debe ir la próxima grúa disponible. Sin embargo, el sistema es mucho más flexible y robusto si tales decisiones se toman mediante procedimientos personalizados. La capa de red se conecta con la capa lógica mediante el envío de activadores que informan sobre la situación, y mediante la solicitud y recepción de pedidos explícitos. Una de las ventajas de hacer esto externamente es que las lógicas pueden ser tan complicadas como lo son en la mayoría de las configuraciones reales. Además, el efecto de la incertidumbre en la ejecución del proceso también podría evaluarse con bastante facilidad mediante los modelos de simulación.

La capa visual es una parte clave en el modelo y se ha convertido en una de las partes de mayor relevancia para cualquier paquete DES. Normalmente, esta es la capa que conecta a los usuarios con la herramienta de simulación. En términos explícitos, el uso de imágenes que parecen elementos reales (la biblioteca de Google Sketchup podría ayudar a hacer esto) se combina bastante bien. Sin embargo, la capa visual puede representar otras vistas del sistema, como los elementos Andon. Si la capa visual es capaz de interactuar con los usuarios, se puede agregar una característica muy interesante, por ejemplo, deteniendo máquinas o cerrando pasillos.

Figura 38. Conexiones entre las capas del modelo de simulación, usuarios e ingenieros.



Fuente: Saez-Mas, Garcia-Sabater, y Morant-Llorca (2018).

A través de la capa visual también se puede utilizar la capacidad de aceptar las entradas del usuario para cambiar los parámetros en la capa de la base de datos, y no solo para mostrarlos, sino también para responder a preguntas específicas

realizadas por la capa lógica a la hora de tomar decisiones y ver sus efectos inmediatos.

Por último, y no menos importante, la capa lógica utiliza los datos almacenados en la capa de base de datos para respaldar los procesos de toma de decisiones. La capa lógica necesita leer información relevante, por ejemplo, la ubicación de cada referencia en el almacén, la secuencia de montaje, el número de elementos que viajan en un pasillo específico o la cantidad de stock disponible en el *Point of Fit* en la línea de ensamblaje. La capa lógica también es capaz de insertar datos en la base de datos sobre la decisión tomada, los resultados obtenidos y las interacciones con los usuarios a través de la capa visual.

Como se espera que la mayor parte del intercambio se realice a través de la base de datos, lo cual también sucede con los ERP en configuraciones reales, y tal es el caso en tal configuración, las máquinas pueden tener su propia inteligencia (sistemas similares a PLC) y los elementos visuales se pueden completar directamente por los usuarios en tableros no integrados. A medida que la simulación intenta replicar la realidad, el equipo involucrado obtendrá una comprensión mucho más profunda de los procesos reales.

11.2 Capítulo 5: Herramienta de auditoría

11.2.1 Entorno de trabajo

Tabla 60. Preguntas de auditoría relacionadas con el entorno de trabajo.

ID	Clasificación	Pregunta de auditoría	1	2	3	4
1	Diseño	¿Cómo es el actual diseño del flujo de material?	No se han minimizado los puntos conflictivos entre los elementos de manutención, y entre los elementos de manutención y los peatones. Se han detectado varios puntos conflictivos detectados deben ser revisados urgentemente.	Se han detectado algunos puntos conflictivos entre los elementos de manutención, y entre los elementos de manutención y los peatones que es necesario revisar urgentemente.	El entorno está parcialmente diseñado de acuerdo a consideraciones del tráfico y seguridad de manera que no se han minimizado los puntos conflictivos. Los puntos detectados entre los elementos de manutención, y entre los elementos de manutención y los peatones que se recomienda revisar periódicamente.	El entorno está diseñado de acuerdo a consideraciones del tráfico y seguridad de manera que se han minimizado los puntos conflictivos entre los elementos de manutención, y entre los elementos de manutención y los peatones.

2	Diseño	¿Cómo están separados los peatones y los elementos de manutención?	Los elementos de manutención y los peatones no están separados con barreras de seguridad.	Los elementos de manutención y los peatones no están separados con barreras de seguridad y estas son insuficientes o no garantizan su función.	Los elementos de manutención y los peatones están separados con barreras de seguridad, pero deben ser revisadas.	Los elementos de manutención y los peatones están separados correctamente con medidas de seguridad.
3	Diseño	¿Cómo se ha separado las zonas de actividad de peatones de los elementos de manutención?	Las zonas destinadas a la actividad de trabajadores no están correctamente delimitadas por lo que los elementos de manutención pueden acceder libremente.	Las zonas destinadas a la actividad de trabajadores están parcialmente delimitadas y hay una elevada probabilidad de acceso de elementos de manutención en caso de error.	Las zonas destinadas a la actividad de trabajadores están delimitadas, pero permite que algunos elementos de manutención se acerquen.	Las zonas destinadas a la actividad de trabajadores están correctamente delimitadas para evitar el acceso de elementos de manutención.
4	Diseño	¿Cómo son los pasillos de la planta?	Los pasillos de la planta son bidireccionales.	La mayor parte de los pasillos son bidireccionales con una menor proporción de unidireccionales	La mayor parte de los pasillos son unidireccionales con una menor proporción de bidireccionales.	Los pasillos de la planta son de una única dirección.

5	Entorno seguro	¿Cuál es la velocidad de los elementos de manutención dentro de la planta por donde también circulan peatones?	La velocidad de los elementos de manutención supera 5 m/s	La velocidad de los elementos de manutención supera 4 m/s	La velocidad de los elementos de manutención supera 2 m/s	La velocidad de los elementos de manutención no supera los 1,5 m/s
6	Entorno seguro	¿Los elementos de manutención realizan maniobras y cambios de sentido en los pasillos?	Están permitidos los cambios de sentido y maniobras o bien no está definida esta política de conducción.	No está permitido realizar cambios de sentido o maniobras, pero los conductos las realizan con asiduidad.	No está permitido realizar cambios de sentido o maniobras, pero los conductos las realizan esporádicamente.	No está permitido realizar cambios de sentido o maniobras.
7	Entorno seguro	¿Cómo es la visibilidad de los conductores a lo largo de la planta?	Hay múltiples estructuras u objetos que restringen la visión de la ruta a seguir	Se han visto varias estructuras u objetos que restringen la visión de la ruta a seguir	Se han visto una o dos estructuras u objetos que restringen la visión de la ruta a seguir	No hay estructuras u objetos que restringen la visión de la ruta a seguir

8	Entorno seguro	¿Hay obstáculos que impidan la correcta circulación de los elementos de manutención?	Hay múltiples objetos que obstruyan el paso de los elementos de manutención.	Hay tramos en los que objetos o material ocupan algunos tramos de pasillos y obliga a los elementos de manutención a tener que esquivarlos.	Hay tramos en los que objetos o material ocupan algunos tramos de circulación y obliga a los elementos de manutención a tener una mayor atención en la circulación.	No hay objetos que obstruyan el paso de los elementos de manutención.
9	Entorno seguro	¿Cómo es, en general, el pavimento de la planta?	El suelo por el que circulan los elementos de manutención no es una superficie plana y lisa. El pavimento está en mal estado o tiene varios tramos con pendiente.	El suelo por el que circulan los elementos de manutención no siempre es una superficie plana y lisa. En algunos puntos concretos el pavimento está en mal estado o tiene algunos tramos con pendiente.	El suelo por el que circulan los elementos de manutención es, dentro de lo posible, superficie plana y lisa.	El suelo por el que circulan los elementos de manutención es una superficie plana y lisa.

10	Entorno seguro	¿Cómo es la iluminación de la planta?	La iluminación de la planta, en general, es insuficiente para detectar todos los objetos de su alrededor y debe ser revisada.	La iluminación de la planta es insuficiente en varios puntos críticos de circulación para detectar todos los objetos de su alrededor.	La iluminación de la planta es suficiente para detectar todos los objetos de su alrededor, aunque cuenta con algunos tramos en los que se debería revisar.	La iluminación de la planta es suficiente para detectar todos los objetos de su alrededor.
11	Entorno seguro	¿Cómo es el nivel de ruido en la planta?	El nivel de ruido dentro de las instalaciones supera el permitido y molesta al trabajador continuamente.	El nivel de ruido dentro de las instalaciones se sitúa en el máximo permitido por lo que de manera continua resulta molesto al trabajador.	El nivel de ruido dentro de las instalaciones no supera el permitido salvo algunas operaciones/momentos en los que sí molesta al trabajador.	El nivel de ruido dentro de las instalaciones no supera el permitido y no molesta al trabajador.
12	Caminos, rutas y señales	¿Cómo y dónde se han ubicado los pasos de peatones?	Los pasos de peatones están ubicados en puntos de poca visibilidad y esquinas.	Los pasos de peatones están ubicados en puntos de buena visibilidad, pero hay varios en esquinas o zonas de poca visibilidad	Los pasos de peatones están ubicados en puntos de buena visibilidad, pero hay alguno en esquinas o zonas de poca visibilidad	Los pasos de peatones están ubicados en puntos de gran visibilidad, evitando esquinas o zonas de poca visibilidad

13	Caminos, rutas y señales	¿Cómo están señalizados los pasos de peatones?	Los pasos de peatones no están correctamente identificados y visibles en el suelo.	Los pasos de peatones no siempre están correctamente identificados y visibles en el suelo.	Los pasos de peatones están correctamente identificados y visibles en el suelo. No se pintan frecuentemente.	Los pasos de peatones están correctamente identificados y visibles en el suelo. Se pintan frecuentemente.
14	Caminos, rutas y señales	¿Cómo están señalizados los pasos de elementos de manutención?	Los pasos de los elementos de manutención no están correctamente identificados y visibles en el suelo.	Los pasos de los elementos de manutención no siempre están correctamente identificados y visibles en el suelo.	Los pasos de los elementos de manutención están correctamente identificados y visibles en el suelo. No se pintan frecuentemente.	Los pasos de los elementos de manutención están correctamente identificados y visibles en el suelo. Se pintan frecuentemente.
15	Caminos, rutas y señales	¿Qué tipo de señalización se ha utilizado a lo largo de la planta?	No se utiliza o se utiliza de manera escasa las señales de tráfico a lo largo de la planta.	Las señales de tráfico son diferentes a las de las vías públicas.	Las señales de tráfico son similares a las de las vías públicas y cumplen los estándares nacionales/internacionales.	Las señales de tráfico son iguales a las de las vías públicas y cumplen los estándares nacionales/internacionales.

16	Caminos, rutas y señales	¿Los caminos están debidamente dimensionados para el tráfico que experimentan diariamente?	Gran parte de los caminos no están debidamente dimensionados y experimentan colas o retenciones que dificultan el suministro. Se debe reconsiderar el diseño actual y evaluar el tráfico existente.	Varios caminos no están debidamente dimensionados y experimentan colas o retenciones en múltiples momentos del día. Se debe reconsiderar el flujo de material que lo atraviesa.	Algún camino no está debidamente dimensionado y experimentan colas o retenciones en algunos momentos del día.	Los caminos están debidamente dimensionados y no experimentan colas o retenciones.
17	Caminos, rutas y señales	¿Cómo se ha colocado la señalización en la planta?	Las señales no se pueden ver fácilmente y no se les aplica un mantenimiento periódico.	Las señales no siempre están ubicadas para que se puedan ver fácilmente y no se les aplica un mantenimiento periódico.	Las señales están ubicadas para que se puedan ver fácilmente y no se les aplica un mantenimiento periódico.	Las señales están ubicadas para que se puedan ver fácilmente y se les aplica un mantenimiento periódico.
18	Accesos	¿Los accesos están debidamente dimensionados?	Gran parte de los accesos no están debidamente dimensionados y experimentan colas o retenciones que dificultan el suministro.	Varios accesos no están debidamente dimensionados y experimentan colas o retenciones en múltiples momentos del día.	Algún acceso no está debidamente dimensionado y experimentan colas o retenciones en algunos momentos del día.	Todos los accesos son suficientemente grandes para albergar todas las cargas sin obstrucciones.

19	Accesos	¿Están las salidas de emergencia y accesos bloqueados por elementos de mantenimiento material?	Las salidas de emergencia se encuentran bloqueadas.	En alguna salida de emergencia hay material o elementos de mantenimiento parados temporalmente.	En alguna salida de emergencia hay material o elementos de mantenimiento parados durante unos minutos.	Las salidas de emergencia y accesos están libres para un correcto movimiento de material.
20	Accesos	En las zonas de trabajo, ¿Se diferencia el acceso de peatones del de los elementos de mantenimiento?	El acceso a las zonas de trabajo no está diferenciado para los peatones y los elementos de mantenimiento.	El acceso de varias zonas de trabajo no está diferenciado para los peatones y los elementos de mantenimiento. Existen pasos de peatones, pero no están correctamente marcados y delimitados.	El acceso de alguna zona de trabajo no está correctamente diferenciado para los peatones y los elementos de mantenimiento.	El acceso a las zonas de trabajo está diferenciado para los peatones y los elementos de mantenimiento.
21	Cruces	En tramos con cruces ¿Se ha considerado el flujo de peatones?	Circulan peatones, y su paso no está marcado.	Existen pasos de peatones, pero no están correctamente marcados y delimitados.	Existen pasos de peatones y están marcados. Algunos requieren revisión.	Existen pasos de peatones y están bien marcados.

22	Cruces	¿Qué medidas se utilizan para reducir el tráfico y/o velocidad en intersecciones y cruces?	En las intersecciones y cruces no hay medidas para reducir el tráfico y/o velocidad.	En algunas intersecciones y cruces hay medidas para reducir el tráfico y/o velocidad.	En las intersecciones y cruces hay al menos una medida para reducir el tráfico y/o velocidad como iluminación, resaltos, señales o rotondas.	En las intersecciones y cruces hay una o varias medidas para reducir el tráfico y/o velocidad como iluminación, resaltos, señales o rotondas.
23	Cruces	¿Los elementos de mantenimiento realizan operaciones en cruces o intersecciones?	En los cruces se realizan paradas y operaciones de carga y descarga de larga duración.	En varios cruces se realizan paradas de los elementos de mantenimiento obstaculizando el paso.	En algunos cruces se realizan paradas rápidas de los elementos de mantenimiento obstaculizando el paso.	En los cruces no se realizan operaciones para garantizar el flujo del material y seguridad de la zona.
24	Cruces	¿Cómo se señalizan los puntos ciegos en cruces e intersecciones?	En los puntos ciegos de intersecciones y esquinas no se utilizan espejos convexos.	En algunos puntos ciegos de intersecciones y esquinas se utilizan espejos convexos.	En los puntos ciegos de intersecciones y esquinas se utilizan espejos convexos que requieren de mantenimiento.	En los puntos ciegos de intersecciones y esquinas se utilizan espejos convexos.

Fuente: Elaboración propia.

11.2.2 Tareas de trabajo, equipos y políticas

Tabla 61. Preguntas de auditoría relacionadas con Tareas de trabajo, equipos y políticas.

ID	Clasificación	Pregunta de auditoría	1	2	3	4
25	Seguridad y prevención	¿En qué estado se encuentran los cinturones de seguridad?	Los cinturones de seguridad de los elementos de manutención están desgastados y no se pueden utilizar.	Los cinturones de seguridad de los elementos de manutención están desgastados y no aseguran al conductor.	Los cinturones de seguridad de los elementos de manutención no están desgastados.	Los cinturones de seguridad de los elementos de manutención no están desgastados y se revisan periódicamente.
26	Seguridad y prevención	¿Los elementos de manutención tienen sistemas de detección de colisiones o de proximidad?	Los elementos de manutención no cuentan con sistemas de detección de colisiones o de proximidad.	Algunos de los elementos de manutención cuentan con sistemas de detección de proximidad.	Los elementos de manutención cuentan con sistemas de detección de proximidad.	Los elementos de manutención cuentan con sistemas de detección de colisiones o de proximidad.
27	Seguridad y prevención	¿La planta cuenta con un plan de mantenimiento programado para los elementos de manutención?	La planta no cuenta con un plan de mantenimiento.	La planta no cuenta con un plan de mantenimiento, sino que temporalmente se van realizando inspecciones y limpiezas.	La planta cuenta con un plan de mantenimiento para asegurar la limpieza y buen estado de los elementos de manutención, pero no se cumple de manera estricta.	La planta cuenta con un plan de mantenimiento para asegurar la limpieza y buen estado de los elementos de manutención.

Modelos y métodos para el análisis, diseño y evaluación de la logística interna de aprovisionamiento a líneas de montaje con mezcla de modelos en fabricación de automóviles

28	Seguridad y prevención	¿Los vehículos tienen destinada una zona de parking?	Las flotas no cuentan con una zona de parking y se aparcen intentando no molestar.	Las flotas no cuentan con una zona de parking, pero se dejan parados sin molestar el tránsito.	Las flotas de vehículos cuentan con una zona de parking, pero no siempre se respeta.	Las flotas de vehículos cuentan con una zona de parking.
29	Políticas de conducción	¿Hay políticas de conducción seguras para los elementos de mantenimiento?	Los elementos de mantenimiento no respetan las políticas de conducción establecidas.	La planta cuenta con políticas de conducción para los elementos de mantenimiento como: no utilizan la marcha atrás durante la conducción, ceder el paso entre flotas, peatones etc. pero no se respetan.	La planta cuenta con políticas de conducción para los elementos de mantenimiento como: no utilizan la marcha atrás durante la conducción, ceder el paso entre flotas, peatones etc. pero en algunos casos no se cumplen.	La planta cuenta con políticas de conducción para los elementos de mantenimiento como no utilizan la marcha atrás durante la conducción, ceder el paso entre flotas, peatones etc. y se cumplen.
30	Políticas de conducción	¿Se utilizan vehículos con menor impacto para los peatones que las carretillas elevadoras?	El elemento de mantenimiento utilizado en toda la planta es la carretilla elevadora.	En los pasillos de las plantas conviven diferentes elementos de mantenimiento.	Siempre que es posible se utiliza otro tipo de carretillas, y se intenta, en la medida de lo posible, separar los flujos en los pasillos.	Siempre que es posible se utiliza otro tipo de carretillas, y se intenta separar los flujos en los pasillos. En este caso se señaliza para prevenir a los peatones.

31	Políticas de conducción	¿Se respeta el recorrido de circulación diseñado para peatones?	Los recorridos de circulación diseñados para peatones no se respetan.	Los recorridos de circulación diseñados para peatones se suelen respetar salvo que haya un camino más directo, aunque menos seguro.	Los recorridos de circulación diseñados para peatones se suelen respetar.	Los recorridos de circulación diseñados para peatones se respetan.
32	Políticas de conducción	¿Se respeta el recorrido de circulación diseñado para elementos de manutención?	Los recorridos de circulación diseñados para elementos de manutención no se respetan.	Los recorridos de circulación diseñados para elementos de manutención se suelen respetar salvo que haya un camino más directo, aunque menos seguro.	Los recorridos de circulación diseñados para elementos de manutención se suelen respetar.	Los recorridos de circulación diseñados para elementos de manutención se respetan.
33	Políticas de conducción	¿Se respeta los límites de velocidad establecidos?	En la planta no se respetan los límites de velocidad establecidos.	En la planta raramente se suelen respetan los límites de velocidad establecidos.	En la planta se suelen respetar los límites de velocidad establecidos.	En la planta se respetan los límites de velocidad establecidos.

34	Políticas de conducción	¿Los conductores toman medidas de seguridad añadidas en puntos conflictivos?	Los conductores no bajan la velocidad, utilizan el claxon y observan en puntos ciegos de intersecciones y esquinas.	Los conductores observan antes de entrar en puntos ciegos de intersecciones y esquinas.	Los conductores suelen realizar al menos dos medidas de seguridad en puntos ciegos de intersecciones y esquinas. Bajar la velocidad, utilizar el claxon u observan	Los conductores bajan la velocidad, utilizan el claxon y observan en puntos ciegos de intersecciones y esquinas.
35	Carga material	¿Cómo se evalúan las cargas que deben transportar los equipos móviles para saber si están sobrecargados, reducen la estabilidad y visibilidad del vehículo ?	Los materiales a remolcar o cargar por las carretillas no se revisan previamente.	Los materiales a remolcar o cargar por las carretillas rara vez se revisan para que no sobrecarguen el vehículo, estén bien ubicados y que no interfieren en la visibilidad durante la conducción.	Los materiales a remolcar o cargar por las carretillas se suelen revisar para que no sobrecarguen el vehículo, estén bien ubicados y que no interfieren en la visibilidad durante la conducción.	Los materiales a remolcar o cargar por las carretillas se revisan para que no sobrecarguen el vehículo, estén bien ubicados y que no interfieren en la visibilidad durante la conducción.

Fuente: Elaboración propia.

11.2.3 Seguridad del personal de trabajo

Tabla 62. Preguntas de auditoría relacionadas con la seguridad del personal de trabajo.

ID tesis	Clasificación	Pregunta de auditoría	1	2	3	4
36	Seguridad del trabajador	¿Se revisa la visión y audición de los conductores?	A los conductores no se les revisa regularmente la visión y audición de los conductores	A los conductores se les revisa la visión y audición cuando acceden al puesto de trabajo.	A los conductores se les revisa cada dos o tres años la visión y audición.	A los conductores se les revisa regularmente la visión y audición.
37	Seguridad del trabajador	¿Existen acuerdos de comunicación de seguridad, en el proceso de trabajo o en la maquinaria al personal?	No existen acuerdos de comunicación de seguridad, en el proceso de trabajo o en la maquinaria al personal	Existen acuerdos de comunicación de seguridad, en el proceso de trabajo o en la maquinaria al personal, pero no de todo lo que se les debería informar.	Existen acuerdos de comunicación de seguridad, en el proceso de trabajo o en la maquinaria al personal mediante tableros de anuncios.	Existen acuerdos de comunicación de seguridad, en el proceso de trabajo o en la maquinaria al personal de manera directa.

Modelos y métodos para el análisis, diseño y evaluación de la logística interna de aprovisionamiento a líneas de montaje con mezcla de modelos en fabricación de automóviles

38	Formación	¿Existen un procedimiento de reporte de incidencias, emergencias y daños?	No existe un procedimiento de reporte de incidencias, emergencias y daños directo entre personal y la planta.	No existe un procedimiento de reporte de incidencias, emergencias y daños, aunque si se suele tratar el tema en reuniones en caso de daño o incidencia.	Existen un procedimiento de reporte de incidencias, emergencias y daños indirecto entre personal y la planta.	Existen un procedimiento de reporte de incidencias, emergencias y daños directo entre personal y la planta.
39	Formación	¿Qué tipo formación reciben los operarios de conducción?	La planta no realiza cursos de formación para los conductores de elementos de mantenimiento.	La planta realiza cursos de formación para los conductores de elementos de mantenimiento cuando acceden al puesto de trabajo.	La planta realiza puntualmente cursos de formación para los conductores de elementos de mantenimiento.	La planta realiza cursos de formación con frecuencia para los conductores de elementos de mantenimiento.
40	Formación	¿Se informa a los visitantes de la planta sobre los peligros de los elementos de mantenimiento?	Los visitantes de la planta no reciben información e indumentaria acerca de los peligros de los elementos de mantenimiento	Se informa a los visitantes de que tienen información disponible sobre los peligros de los elementos de mantenimiento disponible y se recomienda su lectura.	Se informa a los visitantes de que tienen información disponible sobre los peligros de los elementos de mantenimiento disponible y se obliga su lectura y se recomienda el uso de indumentaria de seguridad.	Los visitantes de la planta reciben información acerca de los peligros de los elementos de mantenimiento y se les exige indumentaria de seguridad.

Fuente: Elaboración propia.

11.2.4 Elementos de manutención

Tabla 63. Preguntas de auditoría relacionadas con los elementos de manutención.

ID tesis	Clasificación	Pregunta de auditoría	1	2	3	4
41	Elementos de manutención	¿Se utilizan carretillas elevadoras?	Se utilizan carretillas elevadoras para realizar trabajos en altura y la zona de trabajo no se encuentra correctamente señalizada, sin embargo, estos elementos conviven con otros elementos de manutención y/o peatones.	Se utilizan carretillas elevadoras para realizar trabajos en altura y la zona de trabajo se encuentra correctamente señalizada, sin embargo, estos elementos conviven con otros elementos de manutención y/o peatones.	Se utilizan carretillas elevadoras para realizar trabajos en altura y la zona de trabajo se encuentra correctamente señalizada y separada del resto de flujos de elementos de manutención y peatones.	No se utilizan carretillas elevadoras.
42	Elementos de manutención	¿Se utilizan carretillas remolcadoras?	Se utilizan carretillas remolcadoras en áreas mal señalizadas en las que también circulan otros flujos de carretillas y/o trabajadores que no están correctamente separados.	Se utilizan carretillas remolcadoras en áreas correctamente señalizadas en las que también circulan otros flujos de carretillas y/o trabajadores que no están correctamente separados.	Se utilizan carretillas remolcadoras en áreas correctamente señalizadas en las que también circulan otros flujos de carretillas y/o trabajadores (debidamente separado).	Se utilizan carretillas remolcadoras en áreas correctamente señalizadas y sin que intervenga otro tipo de flujo.

43	Elementos de manutención	¿Se utilizan vehículos autoguiados (AGV)?	Se utilizan vehículos autoguiados implementados en pasillos, cruces y giros por los que también circulan otros elementos de manutención.	Se utilizan vehículos autoguiados correctamente implementados que comparten varios tramos de circulación (pasillos, cruces y giros) con otros elementos de manutención.	Se utilizan vehículos autoguiados correctamente implementados que comparten algún tramo de circulación (pasillo, cruce, giro) con otros elementos de manutención, pero sin posibilidad de choque entre ellos.	Se utilizan vehículos autoguiados correctamente implementados y sin posibilidad de cruce/choque entre ellos o con otros elementos de manutención.
44	Elementos de manutención	¿Cuál es la longitud de los elementos de manutención que circulan por la planta?	Los elementos de manutención remolcan más de 4 plataformas.	Los elementos de manutención remolcan hasta 4 plataformas o tienen una longitud máxima de 14 metros.	Los elementos de manutención no remolcan más de 2 plataformas.	Los elementos de manutención no remolcan más de 1 plataforma.

Fuente: Elaboración propia.

11.3 Capítulo 7: caso de estudio

11.3.1 Entorno de trabajo

Tabla 64. Preguntas de auditoría relacionadas con el Entorno de trabajo del caso de estudio 2.

ID	Clasificación	Pregunta de auditoría	1	2	3	4
1	Diseño	¿Cómo es el actual diseño del flujo de material?	El entorno no está diseñado de acuerdo a consideraciones del tráfico y seguridad de manera que no se han minimizado los puntos conflictivos entre los elementos de manutención, y entre los elementos de manutención y los peatones. Se han detectado varios puntos conflictivos detectados deben ser revisados urgentemente y se recomiendo una evaluación del flujo de material actual.	El entorno no está diseñado de acuerdo a consideraciones del tráfico y seguridad y se han detectado algunos puntos conflictivos entre los elementos de manutención, y entre los elementos de manutención y los peatones que es necesario revisar urgentemente.	El entorno está parcialmente diseñado de acuerdo a consideraciones del tráfico y seguridad de manera que no se han minimizado los puntos conflictivos. Los puntos detectados entre los elementos de manutención, y entre los elementos de manutención y los peatones que se recomienda revisar periódicamente.	El entorno está diseñado de acuerdo a consideraciones del tráfico y seguridad de manera que se han minimizado los puntos conflictivos entre los elementos de manutención, y entre los elementos de manutención y los peatones.

Modelos y métodos para el análisis, diseño y evaluación de la logística interna de aprovisionamiento a líneas de montaje con mezcla de modelos en fabricación de automóviles

2	Diseño	¿Cómo están separados los peatones y los elementos de manutención?	Los elementos de manutención y los peatones no están separados con medidas de seguridad.	Los elementos de manutención y los peatones no están separados con medidas de seguridad insuficientes que no garantizan su función.	Los elementos de manutención y los peatones están separados con medidas de seguridad, pero deben ser revisadas.	Los elementos de manutención y los peatones están separados correctamente con medidas de seguridad.
3	Diseño	¿Cómo se ha separado las zonas de actividad de peatones de los elementos de manutención?	Las zonas destinadas a la actividad de trabajadores no están correctamente delimitadas por lo que los elementos de manutención pueden acceder libremente.	Las zonas destinadas a la actividad de trabajadores están parcialmente delimitadas y hay una elevada probabilidad de acceso de elementos de manutención en caso de error.	Las zonas destinadas a la actividad de trabajadores están delimitadas, pero permite que algunos elementos de manutención se acerquen.	Las zonas destinadas a la actividad de trabajadores están correctamente delimitadas para evitar el acceso de elementos de manutención.
4	Diseño	¿Cómo son los pasillos de la planta?	Los pasillos de la planta son bidireccionales.	La mayor parte de los pasillos son bidireccionales con una menor proporción de unidireccionales.	La mayor parte de los pasillos son unidireccionales con una menor proporción de bidireccionales.	Los pasillos de la planta son de una única dirección.
5	Entorno seguro	¿Cuál es la velocidad de los elementos de manutención dentro de la planta por donde también circulan peatones?	La velocidad de los elementos de manutención supera 5 m/s	La velocidad de los elementos de manutención supera 4 m/s	La velocidad de los elementos de manutención supera 3 m/s	La velocidad de los elementos de manutención no supera los 2 m/s

6	Entorno seguro	¿Los elementos de manutención realizan maniobras y cambios de sentido en los pasillos?	Están permitidos los cambios de sentido y maniobras o bien no está definida esta política de conducción.	No está permitido realizar cambios de sentido o maniobras, pero los conductos las realizan con asiduidad.	No está permitido realizar cambios de sentido o maniobras, pero los conductos las realizan esporádicamente.	No está permitido realizar cambios de sentido o maniobras.
7	Entorno seguro	¿Cómo es la visibilidad de los conductores a lo largo de la planta?	A lo largo de la planta, hay múltiples estructuras u objetos que restringen la visión de la ruta a seguir	A lo largo de la planta, se ha visto varias estructuras u objetos que restringen la visión de la ruta a seguir	A lo largo de la planta, se ha visto una o dos estructuras u objetos que restringen la visión de la ruta a seguir	A lo largo de la planta, no hay estructuras u objetos que restringen la visión de la ruta a seguir
8	Entorno seguro	¿Hay obstáculos que impidan la correcta circulación de los elementos de manutención?	A lo largo de la planta hay múltiples objetos que obstruyan el paso de los elementos de manutención.	A lo largo de la planta hay tramos en los que objetos o material ocupa algunos tramos de pasillos y obliga a los elementos de manutención a tener que esquivarlos.	A lo largo de la planta hay tramos en los que objetos o material ocupa algunos tramos de circulación y obliga a los elementos de manutención a tener una mayor atención en la circulación.	A lo largo de la planta no hay objetos que obstruyan el paso de los elementos de manutención.
9	Entorno seguro	¿Cómo es, en general, el pavimento de la planta?	El suelo por el que circulan los elementos de manutención no es una superficie plana y lisa. El pavimento está en mal estado o tiene varios tramos con pendiente por los que no se aconseja su circulación hasta su revisión.	El suelo por el que circulan los elementos de manutención no siempre es una superficie plana y lisa. En algunos puntos concretos el pavimento está en mal estado o tiene algunos tramos con pendiente y requiere revisión.	El suelo por el que circulan los elementos de manutención es, dentro de lo posible, superficies planas y lisas.	El suelo por el que circulan los elementos de manutención es una superficies plana y lisa.

Modelos y métodos para el análisis, diseño y evaluación de la logística interna de aprovisionamiento a líneas de montaje con mezcla de modelos en fabricación de automóviles

10	Entorno seguro	¿Cómo es la iluminación de la planta?	La iluminación de la planta, en general, es insuficiente para detectar todos los objetos de su alrededor y debe ser revisada.	La iluminación de la planta es insuficiente en varios puntos críticos de circulación para detectar todos los objetos de su alrededor.	La iluminación de la planta es suficiente para detectar todos los objetos de su alrededor, aunque cuenta con algunos tramos en los que se debería revisar.	La iluminación de la planta es suficiente para detectar todos los objetos de su alrededor.
11	Entorno seguro	¿Cómo es el nivel de ruido en la planta?	El nivel de ruido dentro de las instalaciones supera el permitido y molesta al trabajador continuamente.	El nivel de ruido dentro de las instalaciones se sitúa en el máximo permitido por lo que de manera continua resulta molesto al trabajador.	El nivel de ruido dentro de las instalaciones no supera el permitido salvo algunas operaciones/momentos en los que sí molesta al trabajador.	El nivel de ruido dentro de las instalaciones no supera el permitido y no molesta al trabajador.
12	Caminos, rutas y señales	¿Cómo y dónde se han ubicado los pasos de peatones?	Los pasos de peatones están ubicados en puntos de poca visibilidad y esquinas.	Los pasos de peatones están ubicados en puntos de buena visibilidad, pero hay varios en esquinas o zonas de poca visibilidad	Los pasos de peatones están ubicados en puntos de buena visibilidad, pero hay alguno en esquinas o zonas de poca visibilidad	Los pasos de peatones están ubicados en puntos de gran visibilidad, evitando esquinas o zonas de poca visibilidad
13	Caminos, rutas y señales	¿Cómo están señalizados los pasos de peatones?	Los pasos de peatones no están correctamente identificados y visibles en el suelo.	Los pasos de peatones no siempre están correctamente identificados y visibles en el suelo.	Los pasos de peatones están correctamente identificados y visibles en el suelo. No se pintan frecuentemente.	Los pasos de peatones están correctamente identificados y visibles en el suelo. Se pintan frecuentemente.

14	Caminos, rutas y señales	¿Cómo están señalizados los pasos de elementos de mantenimiento?	Los pasos de los elementos de mantenimiento no están correctamente identificados y visibles en el suelo.	Los pasos de los elementos de mantenimiento no siempre están correctamente identificados y visibles en el suelo.	Los pasos de los elementos de mantenimiento están correctamente identificados y visibles en el suelo. No se pintan frecuentemente.	Los pasos de los elementos de mantenimiento están correctamente identificados y visibles en el suelo. Se pintan frecuentemente.
15	Caminos, rutas y señales	¿Qué tipo de señalización se ha utilizado a lo largo de la planta?	No se utiliza o se utiliza de manera escasa las señales de tráfico a lo largo de la planta.	Las señales de tráfico son diferentes a las de las vías públicas.	Las señales de tráfico son similares a las de las vías públicas y cumplen los estándares nacionales/internacionales.	Las señales de tráfico son iguales a las de las vías públicas y cumplen los estándares nacionales/internacionales.
16	Caminos, rutas y señales	¿Los caminos están debidamente dimensionados para el tráfico que experimentan diariamente?	Gran parte de los caminos no están debidamente dimensionados y experimentan colas o retenciones que dificultan el suministro. Se debe reconsiderar el diseño actual y evaluar el tráfico existente.	Varios caminos no están debidamente dimensionados y experimentan colas o retenciones en múltiples momentos del día. Se debe reconsiderar el flujo de material que lo atraviesa.	Algún camino no está debidamente dimensionado y experimentan colas o retenciones en algunos momentos del día.	Los caminos están debidamente dimensionados y no experimentan colas o retenciones.
17	Caminos, rutas y señales	¿Cómo se ha colocado la señalización en la planta?	Las señales no se puedan ver fácilmente y no se les aplica un mantenimiento periódico.	Las señales no siempre están ubicadas para se puedan ver fácilmente y no se les aplica un mantenimiento periódico.	Las señales están ubicadas para se puedan ver fácilmente y no se les aplica un mantenimiento periódico.	Las señales están ubicadas para se puedan ver fácilmente y se les aplica un mantenimiento periódico.

18	Accesos	¿Los accesos están debidamente dimensionados?	Gran parte de los accesos no están debidamente dimensionados y experimentan colas o retenciones que dificultan el suministro. Se debe reconsiderar el diseño actual y evaluar el tráfico existente.	Varios accesos no están debidamente dimensionados y experimentan colas o retenciones en múltiples momentos del día. Se debe reconsiderar el flujo de material que lo atraviesa.	Algún acceso no está debidamente dimensionado y experimentan colas o retenciones en algunos momentos del día.	Todos los accesos son suficientemente grandes para albergar todas las cargas sin obstrucciones.
19	Accesos	¿Están las salidas de emergencia y accesos bloqueados por elementos de manutención material?	Las salidas de emergencia se encuentran bloqueadas.	En alguna salida de emergencia hay material o elementos de manutención parados temporalmente.	En alguna salida de emergencia hay material o elementos de manutención parados durante unos minutos u horas.	Las salidas de emergencia y accesos están libres para un correcto movimiento de material.
20	Accesos	En las zonas de trabajo, ¿Se diferencia el acceso de peatones del de los elementos de manutención?	El acceso a las zonas de trabajo no está diferenciado para los peatones y los elementos de manutención.	El acceso de varias zonas de trabajo no está diferenciado para los peatones y los elementos de manutención.	El acceso de alguna zona de trabajo no está correctamente diferenciado para los peatones y los elementos de manutención.	El acceso a las zonas de trabajo está diferenciado para los peatones y los elementos de manutención.
21	Cruces	En tramos con cruces ¿Se ha considerado el flujo de peatones?	Circulan peatones, pero su paso no está marcado.	Existen pasos de peatones, pero no están correctamente marcados y delimitados.	Existen pasos de peatones y están marcados. Algunos requieren revisión.	Existen pasos de peatones y están bien marcados.

22	Cruces	¿Qué medidas se utilizan para reducir el tráfico y/o velocidad en intersecciones y cruces?	En las intersecciones y cruces no hay medidas para reducir el tráfico y/o velocidad.	En algunas intersecciones y cruces hay medidas para reducir el tráfico y/o velocidad.	En las intersecciones y cruces hay al menos una medida para reducir el tráfico y/o velocidad como iluminación, resaltos, señales o rotondas.	En las intersecciones y cruces hay una o varias medidas para reducir el tráfico y/o velocidad como iluminación, resaltos, señales o rotondas.
23	Cruces	¿Los elementos de manutención realizan operaciones en cruces o intersecciones?	En los cruces se realizan paradas y operaciones de carga y descarga de larga duración.	En varios cruces se realizan paradas de los elementos de manutención obstaculizando el paso.	En algunos cruces se realizan paradas rápidas de los elementos de manutención obstaculizando el paso.	En los cruces no se realizan operaciones para garantizar el flujo del material y seguridad de la zona.
24	Cruces	¿Cómo se señalizan los puntos ciegos en cruces e intersecciones?	En los puntos ciegos de intersecciones y esquinas no se utilizan espejos convexos.	En algunos puntos ciegos de intersecciones y esquinas se utilizan espejos convexos.	En los puntos ciegos de intersecciones y esquinas se utilizan espejos convexos que requieren de mantenimiento.	En los puntos ciegos de intersecciones y esquinas se utilizan espejos convexos.

Fuente: Elaboración propia.

11.3.2 Tareas de trabajo, equipos y políticas

Tabla 65. Preguntas de auditoría relacionadas con Tareas de trabajo, equipos y políticas del caso de estudio 2.

ID	Clasificación	Pregunta de auditoría	1	2	3	4
25	Seguridad y prevención	¿En qué estado se encuentran los cinturones de seguridad?	Los cinturones de seguridad de los elementos de manutención están desgastados y no se pueden utilizar.	Los cinturones de seguridad de los elementos de manutención están desgastados y no aseguran al conductor.	Los cinturones de seguridad de los elementos de manutención no están desgastados.	Los cinturones de seguridad de los elementos de manutención no están desgastados y se revisan periódicamente.
26	Seguridad y prevención	¿Los elementos de manutención tienen sistemas de detección de colisiones o de proximidad?	Los elementos de manutención no cuentan con sistemas de detección de colisiones o de proximidad.	Algunos de los elementos de manutención cuentan con sistemas de detección de proximidad.	Los elementos de manutención cuentan con sistemas de detección de proximidad.	Los elementos de manutención cuentan con sistemas de detección de colisiones o de proximidad.
27	Seguridad y prevención	¿La planta cuenta con un plan de mantenimiento programado para los elementos de manutención?	La planta no cuenta con un plan de mantenimiento.	La planta no cuenta con un plan de mantenimiento, sino que temporalmente se van realizando inspecciones y limpiezas.	La planta cuenta con un plan de mantenimiento para asegurar la limpieza y buen estado de los elementos de manutención, pero no se cumple de manera estricta.	La planta cuenta con un plan de mantenimiento para asegurar la limpieza y buen estado de los elementos de manutención.
28	Seguridad y prevención	¿Los vehículos tienen destinada una zona de parking?	Las flotas no cuentan con una zona de parking y se aparkan intentando no molestar.	Las flotas no cuentan con una zona de parking, pero se dejan parados sin molestar el tránsito.	Las flotas de vehículos cuentan con una zona de parking, pero no siempre se respeta.	Las flotas de vehículos cuentan con una zona de parking.

29	Políticas de conducción	¿Hay políticas de conducción seguras para los elementos de mantenimiento?	Los elementos de mantenimiento no respetan las políticas de conducción establecidas.	La planta cuenta con políticas de conducción para los elementos de mantenimiento como no utilizan la marcha atrás durante la conducción, ceder el paso entre flotas, peatones etc. pero no se respetan.	La planta cuenta con políticas de conducción para los elementos de mantenimiento como no utilizan la marcha atrás durante la conducción, ceder el paso entre flotas, peatones etc. pero en algunos casos no se cumplen.	La planta cuenta con políticas de conducción para los elementos de mantenimiento como no utilizan la marcha atrás durante la conducción, ceder el paso entre flotas, peatones etc. y se cumplen.
30	Políticas de conducción	¿Se utilizan vehículos con menor impacto para los peatones que las carretillas elevadoras?	El elemento de mantenimiento utilizado en toda la planta es la carretilla elevadora.	En los pasillos de las plantas conviven diferentes elementos de mantenimiento.	Siempre que es posible se utiliza otro tipo de carretillas, y se intenta, en la medida de lo posible, separar los flujos en los pasillos.	Siempre que es posible se utiliza otro tipo de carretillas, y se intenta separar los flujos en los pasillos. En este caso se señala para prevenir a los peatones.
31	Políticas de conducción	¿Se sigue el recorrido de circulación diseñado para peatones?	Los recorridos de circulación diseñados para peatones no se respetan.	Los recorridos de circulación diseñados para peatones se suelen respetar salvo que haya un camino más directo, aunque menos seguro.	Los recorridos de circulación diseñados para peatones se suelen respetar.	Los recorridos de circulación diseñados para peatones se respetan.
32	Políticas de conducción	¿Se sigue el recorrido de circulación diseñado para elementos de mantenimiento?	Los recorridos de circulación diseñados para elementos de mantenimiento no se respetan.	Los recorridos de circulación diseñados para elementos de mantenimiento se suelen respetar salvo que haya un camino más directo, aunque menos seguro.	Los recorridos de circulación diseñados para elementos de mantenimiento se suelen respetar.	Los recorridos de circulación diseñados para elementos de mantenimiento se respetan.
33	Políticas de conducción	¿Se siguen los límites de velocidad establecidos?	En la planta no se respetan los límites de velocidad establecidos.	En la planta raramente se suelen respetar los límites de velocidad establecidos.	En la planta se suelen respetar los límites de velocidad establecidos.	En la planta se respetan los límites de velocidad establecidos.

34	Políticas de conducción	¿Los conductores toman medidas de seguridad añadidas en puntos conflictivos?	Los conductores no bajan la velocidad, utilizan el claxon y observan en puntos ciegos de intersecciones y esquinas.	Los conductores observan antes de entrar en puntos ciegos de intersecciones y esquinas.	Los conductores suelen realizar al menos dos medidas de seguridad en puntos ciegos de intersecciones y esquinas. Bajar la velocidad, utilizar el claxon u observan	Los conductores bajan la velocidad, utilizan el claxon y observan en puntos ciegos de intersecciones y esquinas.
35	Carga material	¿Cómo se evalúan las cargas que deben transportar los equipos móviles para saber si están sobrecargados, reducen la estabilidad y visibilidad del vehículo ?	Los materiales a remolcar o cargar por las carretillas no se revisan previamente.	Los materiales a remolcar o cargar por las carretillas rara vez se revisan para que no sobrecarguen el vehículo, estén bien ubicados y que no interfieren en la visibilidad durante la conducción.	Los materiales a remolcar o cargar por las carretillas se suelen revisar para que no sobrecarguen el vehículo, estén bien ubicados y que no interfieren en la visibilidad durante la conducción.	Los materiales a remolcar o cargar por las carretillas se revisan para que no sobrecarguen el vehículo, estén bien ubicados y que no interfieren en la visibilidad durante la conducción.

Fuente: Elaboración propia.

11.3.3 Seguridad del personal de trabajo

Tabla 66. Preguntas de auditoría relacionadas con el Personal de trabajo del caso de estudio 2.

ID tesis	Clasificación	Pregunta de auditoría	1	2	3	4
36	Seguridad del trabajador	¿Se revisa la visión y audición de los conductores?	A los conductores no se les revisa regularmente la visión y audición de los conductores	A los conductores se les revisa la visión y audición cuando acceden al puesto de trabajo.	A los conductores se les revisa cada dos o tres años la visión y audición.	A los conductores se les revisa regularmente la visión y audición.
37	Seguridad del trabajador	¿Existen acuerdos de comunicación de seguridad, en el proceso de trabajo o en la maquinaria al personal?	No existen acuerdos de comunicación de seguridad, en el proceso de trabajo o en la maquinaria al personal	Existen acuerdos de comunicación de seguridad, en el proceso de trabajo o en la maquinaria al personal, pero no de todo lo que se les debería informar.	Existen acuerdos de comunicación de seguridad, en el proceso de trabajo o en la maquinaria al personal mediante tabloneros de anuncios.	Existen acuerdos de comunicación de seguridad, en el proceso de trabajo o en la maquinaria al personal de manera directa.

38	Formación	¿Existen un procedimiento de reporte de incidencias, emergencias y daños?	No existe un procedimiento de reporte de incidencias, emergencias y daños directo entre personal y la planta.	No existe un procedimiento de reporte de incidencias, emergencias y daños, aunque si se suele tratar el tema en reuniones en caso de daño o incidencia.	Existen un procedimiento de reporte de incidencias, emergencias y daños indirecto entre personal y la planta.	Existen un procedimiento de reporte de incidencias, emergencias y daños directo entre personal y la planta.
39	Formación	¿Qué tipo formación reciben los operarios de conducción?	La planta no realiza cursos de formación para los conductores de elementos de manutención.	La planta realiza cursos de formación para los conductores de elementos de manutención cuando acceden al puesto de trabajo.	La planta realiza puntualmente cursos de formación para los conductores de elementos de manutención.	La planta realiza cursos de formación con frecuencia para los conductores de elementos de manutención.
40	Formación	¿Se informa a los visitantes de la planta sobre los peligros de los elementos de manutención?	Los visitantes de la planta no reciben información e indumentaria acerca de los peligros de los elementos de manutención	Se informa a los visitantes de que tienen información disponible sobre los peligros de los elementos de manutención disponible y se recomienda su lectura.	Se informa a los visitantes de que tienen información disponible sobre los peligros de los elementos de manutención disponible y se obliga su lectura y se recomienda el uso de indumentaria de seguridad.	Los visitantes de la planta reciben información acerca de los peligros de los elementos de manutención y se les exige indumentaria de seguridad.

Fuente: Elaboración propia.

11.3.4 Elementos de manutención

Tabla 67. Preguntas de auditoría relacionadas con los elementos de manutención del caso de estudio 2.

ID tesis	Clasificación	Pregunta de auditoría	1	2	3	4
41	Elementos de manutención	¿Se utilizan carretillas elevadoras?	Se utilizan carretillas elevadoras para realizar trabajos en altura y la zona de trabajo no se encuentra correctamente señalizada, sin embargo, estos elementos conviven con otros elementos de manutención y/o peatones.	Se utilizan carretillas elevadoras para realizar trabajos en altura y la zona de trabajo se encuentra correctamente señalizada, sin embargo, estos elementos conviven con otros elementos de manutención y/o peatones.	Se utilizan carretillas elevadoras para realizar trabajos en altura y la zona de trabajo se encuentra correctamente señalizada y separada del resto de flujos de elementos de manutención y peatones.	No se utilizan carretillas elevadoras.
42	Elementos de manutención	¿Se utilizan carretillas remolcadoras?	Se utilizan carretillas remolcadoras en áreas mal señalizadas en las que también circulan otros flujos de carretillas y/o trabajadores que no están correctamente separados.	Se utilizan carretillas remolcadoras en áreas correctamente señalizadas en las que también circulan otros flujos de carretillas y/o trabajadores que no están correctamente separados.	Se utilizan carretillas remolcadoras en áreas correctamente señalizadas en las que también circulan otros flujos de carretillas y/o trabajadores (debidamente separado).	Se utilizan carretillas remolcadoras en áreas correctamente señalizadas y sin que intervenga otro si tipo de flujo.

Modelos y métodos para el análisis, diseño y evaluación de la logística interna de aprovisionamiento a líneas de montaje con mezcla de modelos en fabricación de automóviles

43	Elementos de manutención	¿Se utilizan vehículos autoguiados (AGV)?	Se utilizan vehículos autoguiados implementados en pasillos, cruces y giros por los que también circulan otros elementos de manutención.	Se utilizan vehículos autoguiados correctamente implementados que comparten varios tramos de circulación (pasillos, cruces y giros) con otros elementos de manutención.	Se utilizan vehículos autoguiados correctamente implementados que comparten algún tramo de circulación (pasillo, cruce, giro) con otros elementos de manutención, pero sin posibilidad de choque entre ellos.	No se utilizan AGV ó si se utilizan vehículos autoguiados correctamente implementados y sin posibilidad de cruce/choque entre ellos o con otros elementos de manutención.
44	Elementos de manutención	¿Cuál es la longitud de los elementos de manutención que circulan por la planta?	Los elementos de manutención remolcan más de 4 plataformas.	Los elementos de manutención remolcan hasta 4 plataformas o tienen una longitud máxima de 14 metros.	Los elementos de manutención no remolcan más de 2 plataformas.	Los elementos de manutención no remolcan más de 1 plataformas.

Fuente: Elaboración propia.

11.4 Capítulo 8: caso de estudio

11.4.1 Entorno de trabajo

Tabla 68. Preguntas de auditoría relacionadas con el Entorno de trabajo del caso de estudio 3.

ID	Clasificación	Pregunta de auditoría	1	2	3	4
1	Diseño	¿Cómo es el actual diseño del flujo de material?	El entorno no está diseñado de acuerdo a consideraciones del tráfico y seguridad de manera que no se han minimizado los puntos conflictivos entre los elementos de mantenimiento, y entre los elementos de mantenimiento y los peatones. Se han detectado varios puntos conflictivos detectados deben ser revisados urgentemente y se recomienda una evaluación del flujo de material actual.	El entorno no está diseñado de acuerdo a consideraciones del tráfico y seguridad y se han detectado algunos puntos conflictivos entre los elementos de mantenimiento, y entre los elementos de mantenimiento y los peatones que es necesario revisar urgentemente.	El entorno está parcialmente diseñado de acuerdo a consideraciones del tráfico y seguridad de manera que no se han minimizado los puntos conflictivos. Los puntos detectados entre los elementos de mantenimiento, y entre los elementos de mantenimiento y los peatones que se recomienda revisar periódicamente.	El entorno está diseñado de acuerdo a consideraciones del tráfico y seguridad de manera que se han minimizado los puntos conflictivos entre los elementos de mantenimiento, y entre los elementos de mantenimiento y los peatones.
2	Diseño	¿Cómo están separados los peatones y los elementos de mantenimiento?	Los elementos de mantenimiento y los peatones no están separados con medidas de seguridad.	Los elementos de mantenimiento y los peatones no están separados con medidas de seguridad insuficientes que no garantizan su función.	Los elementos de mantenimiento y los peatones están separados con medidas de seguridad, pero deben ser revisadas.	Los elementos de mantenimiento y los peatones están separados correctamente con medidas de seguridad.

3	Diseño	¿Cómo se ha separado las zonas de actividad de peatones de los elementos de manutención?	Las zonas destinadas a la actividad de trabajadores no están correctamente delimitadas por lo que los elementos de manutención pueden acceder libremente.	Las zonas destinadas a la actividad de trabajadores están parcialmente delimitadas y hay una elevada probabilidad de acceso de elementos de manutención en caso de error.	Las zonas destinadas a la actividad de trabajadores están delimitadas, pero permite que algunos elementos de manutención se acerquen.	Las zonas destinadas a la actividad de trabajadores están correctamente delimitadas para evitar el acceso de elementos de manutención.
4	Diseño	¿Cómo son los pasillos de la planta?	Los pasillos de la planta son bidireccionales.	La mayor parte de los pasillos son bidireccionales con una menor proporción de unidireccionales	La mayor parte de los pasillos son unidireccionales con una menor proporción de bidireccionales.	Los pasillos de la planta son de una única dirección.
5	Entorno seguro	¿Cuál es la velocidad de los elementos de manutención dentro de la planta por donde también circulan peatones?	La velocidad de los elementos de manutención supera 5 m/s	La velocidad de los elementos de manutención supera 4 m/s	La velocidad de los elementos de manutención supera 3 m/s	La velocidad de los elementos de manutención no supera los 2 m/s
6	Entorno seguro	¿Los elementos de manutención realizan maniobras y cambios de sentido en los pasillos?	Están permitidos los cambios de sentido y maniobras o bien no está definida esta política de conducción.	No está permitido realizar cambios de sentido o maniobras pero los conductos las realizan con asiduidad.	No está permitido realizar cambios de sentido o maniobras pero los conductos las realizan esporádicamente.	No está permitido realizar cambios de sentido o maniobras.

7	Entorno seguro	¿Cómo es la visibilidad de los conductores a lo largo de la planta?	A lo largo de la planta, hay múltiples estructuras u objetos que restringen la visión de la ruta a seguir	A lo largo de la planta, se ha visto varias estructuras u objetos que restringen la visión de la ruta a seguir	A lo largo de la planta, se ha visto una o dos estructuras u objetos que restringen la visión de la ruta a seguir	A lo largo de la planta, no hay estructuras u objetos que restringen la visión de la ruta a seguir
8	Entorno seguro	¿Hay obstáculos que impidan la correcta circulación de los elementos de manutención?	A lo largo de la planta hay múltiples objetos que obstruyan el paso de los elementos de manutención.	A lo largo de la planta hay tramos en los que objetos o material ocupa algunos tramos de pasillos y obliga a los elementos de manutención a tener que esquivarlos.	A lo largo de la planta hay tramos en los que objetos o material ocupa algunos tramos de circulación y obliga a los elementos de manutención a tener una mayor atención en la circulación.	A lo largo de la planta no hay objetos que obstruyan el paso de los elementos de manutención.
9	Entorno seguro	¿Cómo es, en general, el pavimento de la planta?	El suelo por el que circulan los elementos de manutención no es una superficie plana y lisa. El pavimento está en mal estado o tiene varios tramos con pendiente por los que no se aconseja su circulación hasta su revisión.	El suelo por el que circulan los elementos de manutención no siempre es una superficie plana y lisa. En algunos puntos concretos el pavimento está en mal estado o tiene algunos tramos con pendiente y requiere revisión.	El suelo por el que circulan los elementos de manutención es, dentro de lo posible, superficies planas y lisas.	El suelo por el que circulan los elementos de manutención es una superficies plana y lisa.
10	Entorno seguro	¿Cómo es la iluminación de la planta?	La iluminación de la planta, en general, es insuficiente para detectar todos los objetos de su alrededor y debe ser revisada.	La iluminación de la planta es insuficiente en varios puntos críticos de circulación para detectar todos los objetos de su alrededor.	La iluminación de la planta es suficiente para detectar todos los objetos de su alrededor, aunque cuenta con algunos tramos en los que se debería revisar.	La iluminación de la planta es suficiente para detectar todos los objetos de su alrededor.

11	Entorno seguro	¿Cómo es el nivel de ruido en la planta?	El nivel de ruido dentro de las instalaciones supera el permitido y molesta al trabajador continuamente.	El nivel de ruido dentro de las instalaciones se sitúa en el máximo permitido por lo que de manera continua resulta molesto al trabajador.	El nivel de ruido dentro de las instalaciones no supera el permitido salvo algunas operaciones/momentos en los que sí molesta al trabajador.	El nivel de ruido dentro de las instalaciones no supera el permitido y no molesta al trabajador.
12	Caminos, rutas y señales	¿Cómo y dónde se han ubicado los pasos de peatones?	Los pasos de peatones están ubicados en puntos de poca visibilidad y esquinas.	Los pasos de peatones están ubicados en puntos de buena visibilidad, pero hay varios en esquinas o zonas de poca visibilidad	Los pasos de peatones están ubicados en puntos de buena visibilidad, pero hay alguno en esquinas o zonas de poca visibilidad	Los pasos de peatones están ubicados en puntos de gran visibilidad, evitando esquinas o zonas de poca visibilidad
13	Caminos, rutas y señales	¿Cómo están señalizados los pasos de peatones?	Los pasos de peatones no están correctamente identificados y visibles en el suelo.	Los pasos de peatones no siempre están correctamente identificados y visibles en el suelo.	Los pasos de peatones están correctamente identificados y visibles en el suelo. No se pintan frecuentemente.	Los pasos de peatones están correctamente identificados y visibles en el suelo. Se pintan frecuentemente.
14	Caminos, rutas y señales	¿Cómo están señalizados los pasos de elementos de manutención?	Los pasos de los elementos de manutención no están correctamente identificados y visibles en el suelo.	Los pasos de los elementos de manutención no siempre están correctamente identificados y visibles en el suelo.	Los pasos de los elementos de manutención están correctamente identificados y visibles en el suelo. No se pintan frecuentemente.	Los pasos de los elementos de manutención están correctamente identificados y visibles en el suelo. Se pintan frecuentemente.
15	Caminos, rutas y señales	¿Qué tipo de señalización se ha utilizado a lo largo de la planta?	No se utiliza o se utiliza de manera escasa las señales de tráfico a lo largo de la planta.	Las señales de tráfico son diferentes a las de las vías públicas.	Las señales de tráfico son similares a las de las vías públicas y cumplen los estándares nacionales/internacionales.	Las señales de tráfico son iguales a las de las vías públicas y cumplen los estándares nacionales/internacionales.

16	Caminos, rutas y señales	<p>¿Los caminos están debidamente dimensionados para el tráfico que experimentan diariamente?</p>	<p>Gran parte de los caminos no están debidamente dimensionados y experimentan colas o retenciones que dificultan el suministro. Se debe reconsiderar el diseño actual y evaluar el tráfico existente.</p>	<p>Varios caminos no están debidamente dimensionados y experimentan colas o retenciones en múltiples momentos del día. Se debe reconsiderar el flujo de material que lo atraviesa.</p>	<p>Alguno camino no está debidamente dimensionado y experimentan colas o retenciones en algunos momentos del día.</p>	<p>Los caminos están debidamente dimensionados y no experimentan colas o retenciones.</p>
17	Caminos, rutas y señales	<p>¿Cómo se ha colocado la señalización en la planta?</p>	<p>Las señales no se puedan ver fácilmente y no se les aplica un mantenimiento periódico.</p>	<p>Las señales no siempre están ubicadas para se puedan ver fácilmente y no se les aplica un mantenimiento periódico.</p>	<p>Las señales están ubicadas para se puedan ver fácilmente y no se les aplica un mantenimiento periódico.</p>	<p>Las señales están ubicadas para se puedan ver fácilmente y se les aplica un mantenimiento periódico.</p>
18	Accesos	<p>¿Los accesos están debidamente dimensionados?</p>	<p>Gran parte de los accesos no están debidamente dimensionados y experimentan colas o retenciones que dificultan el suministro. Se debe reconsiderar el diseño actual y evaluar el tráfico existente.</p>	<p>Varios accesos no están debidamente dimensionados y experimentan colas o retenciones en múltiples momentos del día. Se debe reconsiderar el flujo de material que lo atraviesa.</p>	<p>Alguno acceso no está debidamente dimensionado y experimentan colas o retenciones en algunos momentos del día.</p>	<p>Todos los accesos son suficientemente grandes para albergar todas las cargas sin obstrucciones.</p>

19	Accesos	¿Están las salidas de emergencia y accesos bloqueados por elementos de mantenimiento material?	Las salidas de emergencia se encuentran bloqueadas.	En alguna salida de emergencia hay material o elementos de mantenimiento parados temporalmente.	En alguna salida de emergencia hay material o elementos de mantenimiento parados durante unos minutos u horas.	Las salidas de emergencia y accesos están libres para un correcto movimiento de material.
20	Accesos	En las zonas de trabajo, ¿Se diferencia el acceso de peatones del de los elementos de mantenimiento?	El acceso a las zonas de trabajo no está diferenciado para los peatones y los elementos de mantenimiento.	El acceso de varias zonas de trabajo no está diferenciado para los peatones y los elementos de mantenimiento.	El acceso de alguna zona de trabajo no está correctamente diferenciado para los peatones y los elementos de mantenimiento.	El acceso a las zonas de trabajo está diferenciada para los peatones y los elementos de mantenimiento.
21	Cruces	En tramos con cruces ¿Se ha considerado el flujo de peatones?	Circulan peatones, pero su paso no está marcado.	Existen pasos de peatones, pero no están correctamente marcados y delimitados.	Existen pasos de peatones y están marcados. Algunos requieren revisión.	Existen pasos de peatones y están bien marcados.
22	Cruces	¿Qué medidas se utilizan para reducir el tráfico y/o velocidad en intersecciones y cruces?	En las intersecciones y cruces no hay medidas para reducir el tráfico y/o velocidad.	En algunas intersecciones y cruces hay medidas para reducir el tráfico y/o velocidad.	En las intersecciones y cruces hay al menos una medida para reducir el tráfico y/o velocidad como iluminación, resaltos, señales o rotondas.	En las intersecciones y cruces hay una o varias medidas para reducir el tráfico y/o velocidad como iluminación, resaltos, señales o rotondas.

23	Cruces	¿Los elementos de manutención realizan operaciones en cruces o intersecciones?	En los cruces se realizan paradas y operaciones de carga y descarga de larga duración.	En varios cruces se realizan paradas de los elementos de manutención obstaculizando el paso.	En algunos cruces se realizan paradas rápidas de los elementos de manutención obstaculizando el paso.	En los cruces no se realizan operaciones para garantizar el flujo del material y seguridad de la zona.
24	Cruces	¿Cómo se señalizan los puntos ciegos en cruces e intersecciones?	En los puntos ciegos de intersecciones y esquinas no se utilizan espejos convexos.	En algunos puntos ciegos de intersecciones y esquinas se utilizan espejos convexos.	En los puntos ciegos de intersecciones y esquinas se utilizan espejos convexos que requieren de mantenimiento.	En los puntos ciegos de intersecciones y esquinas se utilizan espejos convexos.

Fuente: Elaboración propia.

11.4.2 Tareas de trabajo, equipos y políticas

Tabla 69. Preguntas de auditoría relacionadas con Tareas de trabajo, equipos y políticas del caso de estudio 3.

ID	Clasificación	Pregunta de auditoría	1	2	3	4
25	Seguridad y prevención	¿En qué estado se encuentran los cinturones de seguridad?	Los cinturones de seguridad de los elementos de manutención están desgastados y no se pueden utilizar.	Los cinturones de seguridad de los elementos de manutención están desgastados y no aseguran al conductor.	Los cinturones de seguridad de los elementos de manutención no están desgastados.	Los cinturones de seguridad de los elementos de manutención no están desgastados y se revisan periódicamente.
26	Seguridad y prevención	¿Los elementos de manutención tienen sistemas de detección de colisiones o de proximidad?	Los elementos de manutención no cuentan con sistemas de detección de colisiones o de proximidad.	Algunos de los elementos de manutención cuentan con sistemas de detección de proximidad.	Los elementos de manutención cuentan con sistemas de detección de proximidad.	Los elementos de manutención cuentan con sistemas de detección de colisiones o de proximidad.

27	Seguridad y prevención	¿La planta cuenta con un plan de mantenimiento programado para los elementos de manutención?	La planta no cuenta con un plan de mantenimiento.	La planta no cuenta con un plan de mantenimiento sino que temporalmente se van realizando inspecciones y limpiezas.	La planta cuenta con un plan de mantenimiento para asegurar la limpieza y buen estado de los elementos de manutención, pero no se cumple de manera estricta.	La planta cuenta con un plan de mantenimiento para asegurar la limpieza y buen estado de los elementos de manutención.
28	Seguridad y prevención	¿Los vehículos tienen destinada una zona de parking?	Las flotas no cuentan con una zona de parking y se aparkan intentando no molestar.	Las flotas no cuentan con una zona de parking pero se dejan parados sin molestar el tránsito.	Las flotas de vehículos cuentan con una zona de parking pero no siempre se respeta.	Las flotas de vehículos cuentan con una zona de parking.
29	Políticas de conducción	¿Hay políticas de conducción seguras para los elementos de manutención?	Los elementos de manutención no respetan las políticas de conducción establecidas.	La planta cuenta con políticas de conducción para los elementos de manutención como no utilizan la marcha atrás durante la conducción, ceder el paso entre flotas, peatones etc pero no se respetan.	La planta cuenta con políticas de conducción para los elementos de manutención como no utilizan la marcha atrás durante la conducción, ceder el paso entre flotas, peatones etc pero en algunos casos no se cumplen.	La planta cuenta con políticas de conducción para los elementos de manutención como no utilizan la marcha atrás durante la conducción, ceder el paso entre flotas, peatones etc y se cumplen.
30	Políticas de conducción	¿Se utilizan vehículos con menor impacto para los peatones que las carretillas elevadoras?	El elemento de manutención utilizado en toda la planta es la carretilla elevadora.	En los pasillos de las plantas conviven diferentes elementos de manutención.	Siempre que es posible se utiliza otro tipo de carretillas, y se intenta, en la medida de lo posible, separar los flujos en los pasillos.	Siempre que es posible se utiliza otro tipo de carretillas, y se intenta separar los flujos en los pasillos. En este caso se señala para prevenir a los peatones.
31	Políticas de conducción	¿Se sigue el recorrido de circulación diseñado para peatones?	Los recorridos de circulación diseñados para peatones no se respetan.	Los recorridos de circulación diseñados para peatones se suelen respetar salvo que haya un camino más directo aunque menos seguro.	Los recorridos de circulación diseñados para peatones se suelen respetar.	Los recorridos de circulación diseñados para peatones se respetan.

Modelos y métodos para el análisis, diseño y evaluación de la logística interna de aprovisionamiento a líneas de montaje con mezcla de modelos en fabricación de automóviles

32	Políticas de conducción	¿Se sigue el recorrido de circulación diseñado para elementos de manutención?	Los recorridos de circulación diseñados para elementos de manutención no se respetan.	Los recorridos de circulación diseñados para elementos de manutención se suelen respetar salvo que haya un camino más directo, aunque menos seguro.	Los recorridos de circulación diseñados para elementos de manutención se suelen respetar.	Los recorridos de circulación diseñados para elementos de manutención se respetan.
33	Políticas de conducción	¿Se siguen los límites de velocidad establecidos?	En la planta no se respetan los límites de velocidad establecidos.	En la planta raramente se suelen respetan los límites de velocidad establecidos.	En la planta se suelen respetan los límites de velocidad establecidos.	En la planta se respetan los límites de velocidad establecidos.
34	Políticas de conducción	¿Los conductores toman medidas de seguridad añadidas en puntos conflictivos?	Los conductores no bajan la velocidad, utilizan el claxon y observan en puntos ciegos de intersecciones y esquinas.	Los conductores observan antes de entrar en puntos ciegos de intersecciones y esquinas.	Los conductores suelen realizar al menos dos medidas de seguridad en puntos ciegos de intersecciones y esquinas. Bajar la velocidad, utilizar el claxon u observan	Los conductores bajan la velocidad, utilizan el claxon y observan en puntos ciegos de intersecciones y esquinas.
35	Carga material	¿Cómo se evalúan las cargas que deben transportar los equipos móviles para saber si están sobrecargados, reducen la estabilidad y visibilidad del vehículo ?	Los materiales a remolcar o cargar por las carretillas no se revisan previamente.	Los materiales a remolcar o cargar por las carretillas rara vez se revisan para que no sobrecarguen el vehículo, estén bien ubicados y que no interfieren en la visibilidad durante la conducción.	Los materiales a remolcar o cargar por las carretillas se suelen revisan para que no sobrecarguen el vehículo, estén bien ubicados y que no interfieren en la visibilidad durante la conducción.	Los materiales a remolcar o cargar por las carretillas se revisan para que no sobrecarguen el vehículo, estén bien ubicados y que no interfieren en la visibilidad durante la conducción.

Fuente: Elaboración propia.

11.4.3 Seguridad del personal de trabajo

Tabla 70. Preguntas de auditoría relacionadas con el Personal de trabajo del caso de estudio 3.

ID tesis	Clasificación	Pregunta de auditoría	1	2	3	4
36	Seguridad del trabajador	¿Se revisa la visión y audición de los conductores?	A los conductores no se les revisa regularmente la visión y audición de los conductores	A los conductores se les revisa la visión y audición cuando acceden al puesto de trabajo.	A los conductores se les revisa cada dos o tres años la visión y audición.	A los conductores se les revisa regularmente la visión y audición.
37	Seguridad del trabajador	¿Existen acuerdos de comunicación de seguridad, en el proceso de trabajo o en la maquinaria al personal?	No existen acuerdos de comunicación de seguridad, en el proceso de trabajo o en la maquinaria al personal	Existen acuerdos de comunicación de seguridad, en el proceso de trabajo o en la maquinaria al personal, pero no de todo lo que se les debería informar.	Existen acuerdos de comunicación de seguridad, en el proceso de trabajo o en la maquinaria al personal mediante tabloneros de anuncios.	Existen acuerdos de comunicación de seguridad, en el proceso de trabajo o en la maquinaria al personal de manera directa.
38	Formación	¿Existen un procedimiento de reporte de incidencias, emergencias y daños?	No existe un procedimiento de reporte de incidencias, emergencias y daños directo entre personal y la planta.	No existe un procedimiento de reporte de incidencias, emergencias y daños, aunque si se suele tratar el tema en reuniones en caso de daño o incidencia.	Existen un procedimiento de reporte de incidencias, emergencias y daños indirecto entre personal y la planta.	Existen un procedimiento de reporte de incidencias, emergencias y daños directo entre personal y la planta.
39	Formación	¿Qué tipo formación reciben los operarios de conducción?	La planta no realiza cursos de formación para los conductores de elementos de mantenimiento.	La planta realiza cursos de formación para los conductores de elementos de mantenimiento cuando acceden al puesto de trabajo.	La planta realiza puntualmente cursos de formación para los conductores de elementos de mantenimiento.	La planta realiza cursos de formación con frecuencia para los conductores de elementos de mantenimiento.

Modelos y métodos para el análisis, diseño y evaluación de la logística interna de aprovisionamiento a líneas de montaje con mezcla de modelos en fabricación de automóviles

40	Formación	¿Se informa a los visitantes de la planta sobre los peligros de los elementos de manutención?	Los visitantes de la planta no reciben información e indumentaria acerca de los peligros de los elementos de manutención	Se informa a los visitantes de que tienen información disponible sobre los peligros de los elementos de manutención disponible y se recomienda su lectura.	Se informa a los visitantes de que tienen información disponible sobre los peligros de los elementos de manutención disponible y se obliga su lectura y se recomienda el uso de indumentaria de seguridad.	Los visitantes de la planta reciben información acerca de los peligros de los elementos de manutención y se les exige indumentaria de seguridad.
----	-----------	---	--	--	--	---

Fuente: Elaboración propia.

11.4.4 Elementos de manutención

Tabla 71. Preguntas de auditoría relacionadas con los elementos de manutención del caso de estudio 3.

ID tesis	Clasificación	Pregunta de auditoría	1	2	3	4
41	Elementos de manutención	¿Se utilizan carretillas elevadoras?	Se utilizan carretillas elevadoras para realizar trabajos en altura y la zona de trabajo no se encuentra correctamente señalizada, sin embargo, estos elementos conviven con otros elementos de manutención y/o peatones.	Se utilizan carretillas elevadoras para realizar trabajos en altura y la zona de trabajo se encuentra correctamente señalizada, sin embargo, estos elementos conviven con otros elementos de manutención y/o peatones.	Se utilizan carretillas elevadoras para realizar trabajos en altura y la zona de trabajo se encuentra correctamente señalizada y separada del resto de flujos de elementos de manutención y peatones.	No se utilizan carretillas elevadoras.

Modelos y métodos para el análisis, diseño y evaluación de la logística interna de aprovisionamiento a líneas de montaje con mezcla de modelos en fabricación de automóviles

42	Elementos de manutención	¿Se utilizan carretillas remolcadoras?	Se utilizan carretillas remolcadoras en áreas mal señalizadas en las que también circulan otros flujos de carretillas y/o trabajadores que no están correctamente separados.	Se utilizan carretillas remolcadoras en áreas correctamente señalizadas en las que también circulan otros flujos de carretillas y/o trabajadores que no están correctamente separados.	Se utilizan carretillas remolcadoras en áreas correctamente señalizadas en las que también circulan otros flujos de carretillas y/o trabajadores (debidamente separado).	Se utilizan carretillas remolcadoras en áreas correctamente señalizadas y sin que intervenga otro si tipo de flujo.
43	Elementos de manutención	¿Se utilizan vehículos autoguiados (AGV)?	Se utilizan vehículos autoguiados implementados en pasillos, cruces y giros por los que también circulan otros elementos de manutención.	Se utilizan vehículos autoguiados correctamente implementados que comparten varios tramos de circulación (pasillos, cruces y giros) con otros elementos de manutención, pero	Se utilizan vehículos autoguiados correctamente implementados que comparten algún tramo de circulación (pasillo, cruce, giro) con otros elementos de manutención, pero sin posibilidad de choque entre ellos.	No se utilizan AGV ó si se utilizan vehículos autoguiados correctamente implementados y sin posibilidad de cruce/choque entre ellos o con otros elementos de manutención.
44	Elementos de manutención	¿Cuál es la longitud de los elementos de manutención que circulan por la planta?	Los elementos de manutención remolcan más de 4 plataformas.	Los elementos de manutención remolcan hasta 4 plataformas o tienen una longitud máxima de 14 metros.	Los elementos de manutención no remolcan más de 2 plataformas.	Los elementos de manutención no remolcan más de 1 plataformas.

Fuente: Elaboración propia.

REFERENCIAS

- Agnētis, a., Pacifici, A., Rossi, F., Lucertini, M., Nicoletti, S., Nicolò, F., ... Pesaro, E. (1997). Scheduling of flexible flow lines in an automobile assembly plant. *European Journal of Operational Research*, 97(2), 348–362. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(96\)00203-2](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(96)00203-2)
- Alford, D., Sackett, P., & Nelder, G. (2000). Mass customisation — an automotive perspective. *International Journal of Production Economics*, 65(1), 99–110. [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(99\)00093-6](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(99)00093-6)
- Alizon, F, Dallery, Y., Feillet, D., & Michelon, P. (2007). Solution of a facility layout problem in a final assembly workshop using constraint programming. *INFOR*, 45(2), 65–73. <https://doi.org/10.3138/infor.45.2.65>
- Alizon, Fabrice, Dallery, Y., Essafi, I., & Feillet, D. (2009a). Optimising material handling costs in an assembly workshop. *International Journal of Production Research*, 47(14), 3853–3866. <https://doi.org/10.1080/00207540701851764>
- Alizon, Fabrice, Dallery, Y., Essafi, I., & Feillet, D. (2009b). Optimising material handling costs in an assembly workshop. *International Journal of Production Research*, 47(14), 3853–3866. <https://doi.org/10.1080/00207540701851764>
- Alnahhal, M., & Noche, B. (2013). Efficient material flow in mixed model assembly lines. *Springer Plus*, 2(1), 415. <https://doi.org/10.1186/2193-1801-2-415>
- Alnahhal, M., & Noche, B. (2015a). A genetic algorithm for supermarket location problem. *Assembly Automation*, 35(1), 122–127. <https://doi.org/10.1108/AA-02-2014-018>
- Alnahhal, M., & Noche, B. (2015b). Dynamic material flow control in mixed model assembly lines. *Computer & Industrial Engineering*, 85, 110–119. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2015.03.009>
- Andrejić, M., & Kilibarda, M. (2016). A framework for measuring and improving efficiency. *International Journal for Traffic and Transport Engineering*, 6(2), 137–148. [https://doi.org/10.7708/ijtte.2016.6\(2\).02](https://doi.org/10.7708/ijtte.2016.6(2).02)
- Andriolo, A., Battini, D., Persona, A., & Sgarbossa, F. (2016). A new bi-objective approach for including ergonomic principles into EOQ model. *International Journal of Production Research*, 54(9), 2610–2627. <https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1113324>
- Aneziris, O. N., Papazoglou, I. A., & Doudakmani, O. (2010). Assessment of occupational risks in an aluminium processing industry. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 40(3), 321–329. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2010.01.005>

- Anil Kumar, C. N., Sakthivel, M., Elangovan, R. K., & Arularasu, M. (2015). Analysis of Material Handling Safety in Construction Sites and Countermeasures for Effective Enhancement. *Scientific World Journal*, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/742084>
- Anjos, M. F., & Vieira, M. V. C. (2017). Mathematical optimization approaches for facility layout problems: The state-of-the-art and future research directions. *European Journal of Operational Research*, 261(1), 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.01.049>
- Arifin & Egbelu. (2000). Determination of vehicle requirements in automated guided vehicle systems : A statistical approach. *Production Planning & Control: The Management of Operations*, 11(2), 258–270.
- Barenji, R. V., Ozkaya, B. Y., & Barenji, A. V. (2017). Quantifying the advantage of a kitting system using Petri nets: a case study in Turkey, modeling, analysis, and insights. *INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY*, 93(9–12), 3677–3691. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0430-y>
- Basa, K., Zemva, A., Baša, K., Žemva, A., Basa, K., Zemva, A., ... Zemva, A. (2011). Simulation and verification of a dynamic model of the electric forklift truck. *Intelligent Automation and Soft Computing*, 17(1), 13–30. <https://doi.org/10.1080/10798587.2011.10643130>
- Battini, D., Gamberi, M., Persona, A., & Sgarbossa, F. (2015). Part-feeding with supermarket in assembly systems: Transportation mode selection model and multi-scenario analysis. *Assembly Automation*, 35(1), 149–159. <https://doi.org/10.1108/AA-06-2014-053>
- Battini, Daria, Boysen, N., & Emde, S. (2013). Just-in-Time supermarkets for part supply in the automobile industry. *Journal of Management Control*, 24(2), 209–217. <https://doi.org/10.1007/s00187-012-0154-y>
- Battini, Daria, Calzavara, M., Otto, A., & Sgarbossa, F. (2017). Preventing ergonomic risks with integrated planning on assembly line balancing and parts feeding. *INTERNATIONAL JOURNAL OF PRODUCTION RESEARCH*, 55(24), 7452–7472. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1363427>
- Battini, Daria, Faccio, M., Persona, A., & Sgarbossa, F. (2010). “supermarket warehouses”: Stocking policies optimization in an assembly-to-order environment. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 50(5–8), 775–788. <https://doi.org/10.1007/s00170-010-2555-0>
- Bauters, K., Govaert, T., Limère, V., & Landeghem, H. Van. (2015). Forklift Free Factory : a simulation model to evaluate different transportation systems in the automotive industry. *International Journal of Computer Aided Engineering and Technology*, 7(2), 238–259. <https://doi.org/10.1504/ijcaet.2015.068329>
-

- Benjaafar, S. (2002). Modeling and Analysis of Congestion in the Design of Facility Layouts. *Management Science*, 48(5), 679–704. <https://doi.org/10.1287/mnsc.48.5.679.7800>
- Bevilacqua, M., Ciarapica, F. E., & Paciarotti, C. (2012). Supply chain integration in an Italian automotive company: the case of a kitting system implementation. *International Journal of Productivity and Quality Management*, 10(4), 428. <https://doi.org/10.1504/IJPQM.2012.049632>
- Bhamu, J., & Sangwan, K. S. (2014). Lean manufacturing: literature review and research issues. *International Journal of Operations and Production Management*, 34(7), 876–940. <https://doi.org/10.1108/IJOPM-08-2012-0315>
- Board, T. R. (2010). *Highway capacity manual*. Environmental Protection.
- Bortolini, M., Ferrari, E., Gamberi, M., Manzini, R., & Regattieri, A. (2015). New Kanban model for tow-train feeding system design. *ASSEMBLY AUTOMATION*, 35(1, SI), 128–136. <https://doi.org/10.1108/AA-05-2014-039>
- Boudella, M. E. A., Sahin, E., & Dallery, Y. (2018). Kitting optimisation in Just-in-Time mixed-model assembly lines: assigning parts to pickers in a hybrid robot-operator kitting system. *INTERNATIONAL JOURNAL OF PRODUCTION RESEARCH*, 56(16), 5475–5494. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1418988>
- Boysen, N., & Bock, S. (2011). Scheduling just-in-time part supply for mixed-model assembly lines. *EUROPEAN JOURNAL OF OPERATIONAL RESEARCH*, 211(1), 15–25. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2010.10.029>
- Boysen, N., & Emde, S. (2014). Scheduling the part supply of mixed-model assembly lines in line-integrated supermarkets. *EUROPEAN JOURNAL OF OPERATIONAL RESEARCH*, 239(3), 820–829. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.05.029>
- Boysen, N., Emde, S., Hoeck, M., & Kauderer, M. (2015). Part logistics in the automotive industry: Decision problems, literature review and research agenda. *European Journal of Operational Research*, 242(1), 107–120. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.09.065>
- Boysen, N., Fliedner, M., & Scholl, A. (2009). Level Scheduling for batched JIT supply. *FLEXIBLE SERVICES AND MANUFACTURING JOURNAL*, 21(1–2), 31–50. <https://doi.org/10.1007/s10696-009-9058-z>
- Boywitz, D., Boysen, N., & Briskorn, D. (2016). Resequencing with parallel queues to minimize the maximum number of items in the overflow area. *NAVAL RESEARCH LOGISTICS*, 63(5), 401–415. <https://doi.org/10.1002/nav.21699>
- Bozer, Y. A., & McGinnis, L. F. (1992). Kitting versus line stocking: A conceptual framework and a descriptive model. *International Journal of Production Economics*, 28(1), 1–19. [https://doi.org/10.1016/0925-5273\(92\)90109-K](https://doi.org/10.1016/0925-5273(92)90109-K)

- Braglia, M. (2001). Material handling devices dimensioning in multi-stage assembly line. *PRODUCTION PLANNING & CONTROL*, 12(1), 37–45. <https://doi.org/10.1080/09537280150203960>
- Burinskiene, a. (2011). The travelling of forklifts in warehouses. *International Journal of Simulation Modelling*, 10(4), 204–212. [https://doi.org/10.2507/IJSIMM10\(4\)4.191](https://doi.org/10.2507/IJSIMM10(4)4.191)
- Caputo, A. C., & Pelagagge, P. M. (2011). A methodology for selecting assembly systems feeding policy. In *Industrial Management & Data Systems* (Vol. 111). <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1108/02635571111099749>
- Caputo, A. C., Pelagagge, P. M., & Salini, P. (2015a). A decision model for selecting parts feeding policies in assembly lines. *Industrial Management & Data Systems*, 115(6), 974–1003. <https://doi.org/10.1108/IMDS-02-2015-0054>
- Caputo, A. C., Pelagagge, P. M., & Salini, P. (2015b). A decision model for selecting parts feeding policies in assembly lines. *Industrial Management & Data Systems*, 115(6), 974–1003. <https://doi.org/10.1108/IMDS-02-2015-0054>
- Caputo, A. C., Pelagagge, P. M., & Salini, P. (2015c). Modeling errors in kitting processes for assembly lines feeding. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, 48(3), 338–344. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.104>
- Caputo, A. C., Pelagagge, P. M., & Salini, P. (2015d). Planning models for continuous supply of parts in assembly systems. *Assembly Automation*, 35(1), 35–46. <https://doi.org/10.1108/AA-05-2014-040>
- Caputo, A. C., Pelagagge, P. M., & Salini, P. (2017). Modelling human errors and quality issues in kitting processes for assembly lines feeding. *Computers & Industrial Engineering*, 111, 492–506. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.04.004>
- Çelik, M., & Süral, H. (2016). Order picking in a parallel-aisle warehouse with turn penalties. *International Journal of Production Research*, 54(14), 4340–4355. <https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1154624>
- Centobelli, P., Cerchione, R., & Murino, T. (2016). Layout and Material Flow Optimization in Digital Factory. *International Journal of Simulation Modelling*, 15(2), 223–235. [https://doi.org/10.2507/IJSIMM15\(2\)3.327](https://doi.org/10.2507/IJSIMM15(2)3.327)
- Chang, Q., Pan, C., Xiao, G., & Biller, S. (2013). dificiel_Integrated Modeling of Automotive Assembly Line With Material Handling. *JOURNAL OF MANUFACTURING SCIENCE AND ENGINEERING-TRANSACTIONS OF THE ASME*, 135(1). <https://doi.org/10.1115/1.4023365>
- Chiang, W.-C., Kouvelis, P., & Urban, T. L. (2002). Incorporating Workflow Interference in Facility Layout Design: The Quartic Assignment Problem. *Management Science*, 48(February 2016), 584–590. <https://doi.org/10.1287/mnsc.48.4.584.206>
-

- Chiang, W. C., Kouvelis, P., & Urban, T. L. (2006). Single- and multi-objective facility layout with workflow interference considerations. *European Journal of Operational Research*, 174(3), 1414–1426. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.03.007>
- Choi, W., & Lee, Y. (2002). A dynamic part-feeding system for an automotive assembly line. *Computers & Industrial Engineering*, 43(1–2), 123–134. [https://doi.org/10.1016/S0360-8352\(02\)00071-2](https://doi.org/10.1016/S0360-8352(02)00071-2)
- Chuah, K. H., & Yingling, J. C. (2005). Routing for a just-in-time supply pickup and delivery system. *TRANSPORTATION SCIENCE*, 39(3), 328–339. <https://doi.org/10.1287/trsc.1040.0092>
- Clark, G. M., & Cash, C. R. (1993). Data-driven simulation of networks with manufacturing blocking. *Winter Simulation Conference*, 662–669.
- Cottyn, J., Govaert, T., & Van Landeghem, H. (2008). Alternative line delivery strategies support: A forklift free transition in a high product variety environment. *International Workshop on Harbor Maritime Multimodal Logistics Modeling and Simulation*, 11(c), 55–60.
- de Souza, M. C., de Carvalho, C. R. V., & Brizon, W. B. (2008). Packing items to feed assembly lines. *European Journal of Operational Research*, 184(2), 480–489. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.09.091>
- Debevec, M., Simic, M., & Herakovic, N. (2014). Virtual factory as an advanced approach for production process optimization. *International Journal of Simulation Modelling*, 13(1), 66–78. [https://doi.org/10.2507/IJSIMM13\(1\)6.260](https://doi.org/10.2507/IJSIMM13(1)6.260)
- Deechongkit, S., & Srinon, R. (2013). The Framework of Synchronizing Material Supply Approaches with Facility Layout Design for Mixed Model Assembly Line. *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists, II*, 6.
- Dehghanimohammadabadi, M., & Keyser, T. K. (2017). Intelligent simulation: Integration of SIMIO and MATLAB to deploy decision support systems to simulation environment. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 71, 45–60. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2016.08.007>
- Dong, J., Zhang, L., & Xiao, T. (2016). Part Supply Method for Mixed-Model Assembly Lines with Decentralized Supermarkets. *Tsinghua Science and Technology*, 21(4), 426–434. <https://doi.org/10.1109/TST.2016.7536720>
- Dong, J., Zhang, L., Xiao, T., & Li, H. (2015). A dynamic delivery strategy for material handling in mixed-model assembly lines using decentralized supermarkets. *INTERNATIONAL JOURNAL OF MODELING SIMULATION AND SCIENTIFIC COMPUTING*, 6(4). <https://doi.org/10.1142/S1793962315500385>

- Droste, M., & Deuse, J. (2011). A Planning Approach for In-plant Milk Run Processes to Optimize Material Provision in Assembly Systems. *4th International Conference on Changeable, Agil, Reconfigurable and Virtual Production (CARV2011)*, 605–610.
- Ellis, K. P., Meller, R. D., Wilck, J. H., Parikh, P. J., & Marchand, F. (2010). Effective material flow at an assembly facility. *International Journal of Production Research*, 48(23), 7195–7217. <https://doi.org/10.1080/00207540903186266>
- Emde, S. (2017). Scheduling the replenishment of just-in-time supermarkets in assembly plants. *OR SPECTRUM*, 39(1), 321–345. <https://doi.org/10.1007/s00291-016-0455-x>
- Emde, S., & Boysen, N. (2012a). Optimally locating in-house logistics areas to facilitate JIT-supply of mixed-model assembly lines. *International Journal of Production Economics*, 135, 393–402. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2011.07.022>
- Emde, S., & Boysen, N. (2012b). Optimally routing and scheduling tow trains for JIT-supply of mixed-model assembly lines. *European Journal of Operational Research*, 217(2), 287–299. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.09.013>
- Emde, S., Fliedner, M., & Boysen, N. (2012). Optimally loading tow trains for just-in-time supply of mixed-model assembly lines. *IIE Transactions*, 44(2), 121–135. <https://doi.org/10.1080/0740817X.2011.575442>
- Emde, S., & Gendreau, M. (2017). Scheduling in-house transport vehicles to feed parts to automotive assembly lines. *EUROPEAN JOURNAL OF OPERATIONAL RESEARCH*, 260(1), 255–267. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.12.012>
- Emde, S., & Schneider, M. (2018). Just-In-Time Vehicle Routing for In-House Part Feeding to Assembly Lines. *Transportation Science*, 52(3), 657–672. <https://doi.org/10.1287/trsc.2018.0824>
- Ezema, C. N., Okafor, E. C., & Okezie, C. C. (2017). Industrial design and simulation of a JIT material handling system. *COGENT ENGINEERING*, 4(1). <https://doi.org/10.1080/23311916.2017.1292864>
- Faccio, M. (2014). The impact of production mix variations and models varieties on the parts-feeding policy selection in a JIT assembly system. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 72(1–4), 543–560. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-5675-0>
- Faccio, M., Gamberi, M., & Persona, A. (2013). Kanban number optimisation in a supermarket warehouse feeding a mixed-model assembly system. *INTERNATIONAL JOURNAL OF PRODUCTION RESEARCH*, 51(10), 2997–3017. <https://doi.org/10.1080/00207543.2012.751516>
- Faccio, M., Gamberi, M., Persona, A., Regattieri, A., & Sgarbossa, F. (2013). Design and simulation of assembly line feeding systems in the automotive sector using
-

- supermarket, kanbans and tow trains: A general framework. *Journal of Management Control*, 24(2), 187–208. <https://doi.org/10.1007/s00187-013-0175-1>
- Fathi, M., Rodriguez, V., & Alvarez, M. J. (2014). A novel memetic ant colony optimization-based heuristic algorithm for solving the assembly line part feeding problem. *INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY*, 75(1–4), 629–643. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6068-0>
- Fathi, M., Rodriguez, V., Fontes, D. B. M. M., & Alvarez, M. J. (2016). A modified particle swarm optimisation algorithm to solve the part feeding problem at assembly lines. *INTERNATIONAL JOURNAL OF PRODUCTION RESEARCH*, 54(3, SI), 878–893. <https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1090032>
- Ferreira, T., & Gorlach, I. A. (2016). Development of an Automated Guided Vehicle Controller Using a Model-Based Systems Engineering Approach. *South African Journal of Industrial Engineering August*, 27(2), 206–217. <https://doi.org/10.7166/27-2-1327>
- Ficko, M., & Palcic, I. (2013). Designing a Layout Using the Modified Triangle Method, and Genetic Algorithms. *International Journal of Simulation Modelling*, 12(4), 237–251. [https://doi.org/10.2507/IJSIMM12\(4\)3.244](https://doi.org/10.2507/IJSIMM12(4)3.244)
- Figueira, G., & Almada-Lobo, B. (2014). Hybrid simulation-optimization methods: A taxonomy and discussion. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 46, 118–134. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2014.03.007>
- Finnsgård, C., Wänströ, C., Medbo, L., Neumann, W. P., Finnsgard, C., Wanstrom, C., ... Neumann, W. P. (2011). Impact of materials exposure on assembly workstation performance. *INTERNATIONAL JOURNAL OF PRODUCTION RESEARCH*, 49(24), 7253–7274. <https://doi.org/10.1080/00207543.2010.503202>
- Francisco, R. P., Campos, D. P., Frazzon, E. M., & Machado, R. L. (2016). On the application of modelling and simulation to compare human- and automation-based order-picking systems. *IFAC-PapersOnLine*, 49(12), 1062–1067. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.583>
- Galluccio, E. (2017). *A recursive optimization-simulation approach for the ambulance location and dispatching problem.*
- Gamberi, M., Manzini, R., & Regattieri, A. (2009). An new approach for the automatic analysis and control of material handling systems: Integrated layout flow analysis (ILFA). *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 41(1–2), 156–167. <https://doi.org/10.1007/s00170-008-1466-9>
- Gartner, N., Messer, C., & Rathi, A. (1992). Traffic flow theory— A state-of-the-art report: Revised monograph on traffic flow theory. In *Technical report, U.S. Department of Transportation, Transportation Research Board*. Retrieved from <http://www.tfhrc.gov/its/tft/tft.htm>
-

- Gauthier, F., Giraud, L., Boumival, S., Bourbonniere, R., Richard, J.-G., Daigle, R., & Masse, S. (2007). Development of a loading dock safety evaluation tool. *Journal of Safety Research*, 38(1), 35–51. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2006.08.008>
- Golz, J., Gujjula, R., Guenther, H.-O., Rinderer, S., Ziegler, M., Günther, H. O., ... Ziegler, M. (2012). Part feeding at high-variant mixed-model assembly lines. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 24(2), 119–141. <https://doi.org/10.1007/s10696-011-9116-1>
- Goomas, D. T., & Yeow, P. H. P. (2013). IT-assisted equipment safety checks system to improve compliance: A case study at a distribution center. *SAFETY SCIENCE*, 60, 77–86. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2013.07.002>
- Govaert, T. (2011). *The feasibility of a Forklift Free Factory : a simulation model in the automotive industry.*
- Graham, I. (1992). Comparing trigger and kanban control of flow-line manufacture. *International Journal of Production Research*, 30(10), 2351–2362. <https://doi.org/10.1080/00207549208948159>
- Hanson, R. (2012). *TESIS_In-plant materials supply: supporting the choice between kitting and continuous supply.*
- Hanson, R., & Brodin, A. (2013). A comparison of kitting and continuous supply in in-plant materials supply. *International Journal of Production Research*, 51(4), 979–992. <https://doi.org/10.1080/00207543.2012.657806>
- Hanson, R., Finnsgard, C., & Finnsgård, C. (2014). Impact of unit load size on in-plant materials supply efficiency. *International Journal of Production Economics*, 147(PART A), 46–52. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.08.010>
- Hao, Q., & Shen, W. (2008). Implementing a hybrid simulation model for a Kanban-based material handling system. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 24(5), 635–646. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2007.09.012>
- Hasda, R. K., Bhattacharjya, R. K., & Bennis, F. (2016). Modified genetic algorithms for solving facility layout problems. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 11(3), 1–13. <https://doi.org/10.1007/s12008-016-0362-z>
- Ho, Y. C., LEE, C. E. C., & MOODIE, C. L. (1993). 2 SEQUENCE-PATTERN, MATCHING-BASED, FLOW-ANALYSIS METHODS FOR MULTI-FLOWLINES LAYOUT DESIGN. *INTERNATIONAL JOURNAL OF PRODUCTION RESEARCH*, 31(7), 1557–1578. <https://doi.org/10.1080/00207549308956809>
- Holmström, J., Li, W., Jackson, W., Baumers, M., Özcan, E., Atkin, J., ... Li, W. (2018). To kit or not to kit: Analysing the value of model-based kitting for additive manufacturing. *Computers in Industry*, 98, 100–117. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.01.022>
-

- Horberry, T. (2011). Safe design of mobile equipment traffic management systems. *INTERNATIONAL JOURNAL OF INDUSTRIAL ERGONOMICS*, 41(5), 551–560. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2011.04.003>
- Hua, S. Y., & Johnson, D. J. (2010). Research issues on factors influencing the choice of kitting versus line stocking. *International Journal of Production ResearchOnline) Journal International Journal of Production Research International Journal of Production Research*, 483(3), 20–7543. <https://doi.org/10.1080/00207540802456802>
- Hugan, J. C. (2001). Using simulation to evaluate site traffic at an automobile truck plant. *Proceedings of the 33rd Winter Simulation Conference, December*, 1013–1016. IEEE Computer Society.
- Hund, E. C., Rochow, P., Mach, F., & Nyhuis, P. (2016). Quantitative controlling approach of time synchronicity in convergent supply processes. *PRODUCTION ENGINEERING-RESEARCH AND DEVELOPMENT*, 10(3), 319–327. <https://doi.org/10.1007/s11740-016-0671-x>
- Hwang, H., Kim, S. Y., & Moon, S. W. (1996). Determination of optimum unit load size of the AGV in an electronics assembly production system. *INTERNATIONAL JOURNAL OF PRODUCTION RESEARCH*, 34(5), 1293–1306. <https://doi.org/10.1080/00207549608904966>
- Imran, M., Kang, C., Hae Lee, Y., Zaib, J., & Aziz, H. (2017). Cell Formation in a Cellular Manufacturing System Using Simulation Integrated Hybrid Genetic Algorithm. *Computers & Industrial Engineering*, 105, 123–135. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.12.028>
- Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. (n.d.). Ministerio de trabajo, Migraciones y Seguridad Social. Retrieved from Gestión de la prevención de riesgos laborales en la pequeña y mediana empresa website: <https://www.insst.es/>
- Jainury, S. M., Ramli, R., Ab Rahman, M. N., & Omar, A. (2014). Integrated Set Parts Supply system in a mixed-model assembly line. *Computers and Industrial Engineering*, 75(1), 266–273. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2014.07.008>
- Jainury, S. M., Ramli, R., Rahman, M. N. A., & Omar, A. (2012). An implementation of set parts supply system in the malaysian automotive industry. *Jurnal Teknologi (Sciences and Engineering)*, 59, 19–24.
- Jegen-Perrin, N., Lux, A., Wild, P., & Marsot, J. (2016). Preventing plant-pedestrian collisions: Camera & screen systems and visibility from the driving position. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 53, 284–290. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2016.02.003>

- Johansson, E. (2007). Towards a design process for materials supply systems. *International Journal of Operations & Production Management*, 27(4), 388–408. <https://doi.org/10.1108/01443570710736976>
- Kanduc, T., & Rodic, B. (2016). Optimisation of Machine Layout Using a Force Generated Graph Algorithm and Simulated Annealing. *International Journal of Simulation Modelling*, 15(2), 275–287. [https://doi.org/10.2507/IJSIMM15\(2\)7.335](https://doi.org/10.2507/IJSIMM15(2)7.335)
- Kang, J. (2001). A new trend of parts supply system in Korean automobile industry; The case of the modular production system at Hyundai Motor Company. *Human and Social Science, Economics*, 35(2), 314–317.
- Kasemset, C., & Rinkham, C. (2011). Warehouse Storage Assignment: the Case Study of Camera and Lense Manufacturer. *Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, 1108–1112.
- Kehris, E. (2009). Web-Based simulation of manufacturing systems. *International Journal of Simulation Modelling*, 8(2), 102–113. [https://doi.org/10.2507/IJSIMM08\(2\)4.126](https://doi.org/10.2507/IJSIMM08(2)4.126)
- Kilic, H. S., & Durmusoglu, M. B. (2015). Advances in assembly line parts feeding policies: a literature review. *Assembly Automation*, 35(1), 57–68. <https://doi.org/10.1108/AA-05-2014-047>
- Kim, B. I., Jeong, S., Shin, J., Koo, J., Chae, J., & Lee, S. (2009). A layout- and data-driven generic simulation model for semiconductor fabs. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 22(2), 225–231. <https://doi.org/10.1109/TSM.2009.2017624>
- Kim, J., Yu, G., & Jang, Y. J. (2016). Semiconductor FAB layout design analysis with 300-mm FAB data: Is minimum distance-based layout design best for semiconductor FAB design? *Computers and Industrial Engineering*, 99, 330–346. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.02.012>
- Kortus, G. M., Daumler, M., & Schmidt, T. (2018). POR USAR_ Applying the Discrete Network Design Problem (DNDP) for designing AMHS layouts in semiconductor fabs. *2018 29th Annual SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference, ASMC 2018*, 295–300. <https://doi.org/10.1109/ASMC.2018.8373158>
- Korytkowski, P. P., & Karkoszka, R. R. (2016). Simulation-based efficiency analysis of an in-plant milk-run operator under disturbances. *INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY*, 82(5–8), 827–837. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7442-2>
- Kozan, E. (2000). An integrated material handling system for a truck assembly plant. *Journal of the Operational Research Society*, 51(3), 263–271. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2600921>
-

- Krishnan, K. K., Jithavech, I., & Liao, H. (2009). Mitigation of risk in facility layout design for single and multi-period problems. *International Journal of Production Research*, 47(21), 5911–5940. <https://doi.org/10.1080/00207540802175337>
- Ku, M.-Y., Hu, M. H., & Wang, M.-J. (2011). Simulated annealing based parallel genetic algorithm for facility layout problem. *International Journal of Production Research*, 49(6), 1801–1812. <https://doi.org/10.1080/00207541003645789>
- Kulturel-Konak, S. (2017). A Matheuristic Approach for Solving the Dynamic Facility Layout Problem. *Procedia Computer Science*, 108(June), 1374–1383. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.05.234>
- Kumar, C. S., & Panneerselvam, R. (2007). Literature review of JIT-KANBAN system. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 32(3–4), 393–408. <https://doi.org/10.1007/s00170-005-0340-2>
- Lehocká, D., Hlavatý, I., & Hloch, S. (2016). Rationalization of material flow in production of semitrailer frame for automotive industry. *Tehnicki Vjesnik*, 23(4), 1215–1220. <https://doi.org/10.17559/TV-20131113100109>
- Leveson, N. (2004). A new accident model for engineering safer systems. *Safety Science*, 42(4), 237–270. [https://doi.org/10.1016/S0925-7535\(03\)00047-X](https://doi.org/10.1016/S0925-7535(03)00047-X)
- Li, Y., Yao, X., & Zhou, J. (2016). Multi-objective Optimization of Cloud Manufacturing Service Composition with Cloud-Entropy Enhanced Genetic Algorithm. *Strojniški Vestnik - Journal of Mechanical Engineering*, 62(10), 277–290. <https://doi.org/10.5545/sv-jme.2016.3545>
- Lim, D.-E., & Seo, M. (2014). A Generic Simulation Framework for Efficient Simulation Analyses for Semiconductor Manufacturing: A Case Study. *International Journal of Control & Automation*, 7(2), 75–84. <https://doi.org/10.14257/ijca.2014.7.2.08>
- Limère, V., Landeghem, H. Van, Goetschalckx, M., Aghezzaf, E.-H., & McGinnis, L. F. (2012). Optimising part feeding in the automotive assembly industry: Deciding between kitting and line stocking. *International Journal of Production Research*, 50(15), 4046–4060. <https://doi.org/10.1080/00207543.2011.588625>
- Limère, V., Van Landeghem, H., & Goetschalckx, M. (2015). A decision model for kitting and line stocking with variable operator walking distances. *Assembly Automation*, 35(1), 47–56. <https://doi.org/10.1108/AA-05-2014-043>
- Lolli, F., Gamberini, R., Giberti, C., Rimini, B., & Bondi, F. (2016). A simulative approach for evaluating alternative feeding scenarios in a kanban system. *International Journal of Production Research*, 54(14), 4228–4239. <https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1117675>

- Longo, F., Mirabelli, G., & Papoff, E. (2005). Material Flow Analysis and Plant Lay-Out Optimization of. *IEEE Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications*, (September), 727–731.
- Luo, D., Guan, Z., Wang, C., Yue, L., & Peng, L. (2017). Research on simulation based material delivery system for an automobile company with multi logistics center. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 215(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/215/1/012004>
- Martinez-Barbera, H., Herrero-Perez, D., Martinez-Barbera, H., Herrero-Perez, D., Martinez-Barbera, H., Herrero-Perez, D., ... Herrero-Perez, D. (2010). Development of a flexible AGV for flexible manufacturing systems. *Industrial Robot: An International Journal*, 37(5), 459–468. <https://doi.org/10.1108/01439911011063281>
- Mclean, C., Jones, A., Lee, T., & Riddick, F. (2002). An architecture for a generic data-driven machine shop simulation. *Winter Simulation Conference*, 1108–1116.
- Meyer, M. (2016). Global Automotive Executive Survey 2016. *KPMG International*, 1–52. <https://doi.org/132042>
- Moatari-Kazerouni, A., Chinniah, Y., & Agard, B. (2015). International Journal of Production Research A proposed occupational health and safety risk estimation tool for manufacturing systems A proposed occupational health and safety risk estimation tool for manufacturing systems. *International Journal of Production Research*, 5315, 4459–4475. <https://doi.org/10.1080/00207543.2014.942005>
- Moatari-Kazerouni, A., Chinniah, Y., Agard, B., Moatari-Kazerouni, Afrooz Chinniah, Y., & Agard, B. (2015). Integrating occupational health and safety in facility layout planning, part I: methodology. *International Journal of Production Research*, 53(11), 3243–3259. <https://doi.org/10.1080/00207543.2014.970712>
- Mourtzis, D., Doukas, M., & Bernidaki, D. (2014). Simulation in Manufacturing: Review and Challenges. *Procedia CIRP*, 25(Figure 1), 213–229. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.10.032>
- Negahban, A., & Smith, J. S. (2014). Simulation for manufacturing system design and operation: Literature review and analysis. *Journal of Manufacturing Systems*, 33(2), 241–261. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2013.12.007>
- Neumann, W. P., & Medbo, L. (2010). Ergonomic and technical aspects in the redesign of material supply systems: Big boxes vs. narrow bins. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 40(5), 541–548. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2010.06.004>
- Nourmohammadi, A., & Eskandari, H. (2017). Assembly line design considering line balancing and part feeding. *Assembly Automation*, 37(1), 135–143. <https://doi.org/10.1108/AA-09-2016-122>
-

- Nourmohammadi, A., Eskandari, H., & Fathi, M. (2019). Design of stochastic assembly lines considering line balancing and part feeding with supermarkets. *ENGINEERING OPTIMIZATION*, 51(1), 63–83. <https://doi.org/10.1080/0305215X.2018.1439944>
- Pan, C., Chang, Q., & Ni, J. (2012). Real Time Dispatching Control of Multi-Dollies Material Handling Systems in General Assembly Lines. *ASME 2012 International Manufacturing Science and Engineering Conference*, 377. <https://doi.org/10.1115/MSEC2012-7333>
- Peng, T., & Zhou, B. (2018). Scheduling multiple servers to facilitate just-in-time part-supply in automobile assembly lines. *ASSEMBLY AUTOMATION*, 38(3), 347–360. <https://doi.org/10.1108/AA-08-2017-102>
- Pidd, M. (1992). Guidelines for the design of data driven generic simulators for specific domains. *Simulation*, 59(4), 237–243.
- Prajapat, N., & Tiwari, A. (2017). A review of assembly optimisation applications using discrete event simulation. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 30(2–3), 215–228. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2016.1145812>
- PwC. (2018). Five trends transforming the Automotive Industry. *5 Trends Transforming the Auto Industry*, 1(1), 35–45.
- PWC. (2017). *2017 Automotive Industry Trends*. 1–15. Retrieved from <https://www.strategyand.pwc.com/media/file/2017-Automotive-Industry-Trends.pdf>
- Raju, K. R., Reddy, K. R. B., Chetty, O. V. K., Ravi Raju, K., Rama Bhupal Reddy, K., & Krishnaiah Chetty, O. V. (1997). Modelling and simulation of just-in-time flexible systems. *SADHANA*, 22(1), 101–120. <https://doi.org/10.1007/BF02744129>
- Rao, Y.-Q., Wang, M.-C., Wang, K.-P., & Wu, T.-M. (2013). Scheduling a single vehicle in the just-in-time part supply for a mixed-model assembly line. *COMPUTERS & OPERATIONS RESEARCH*, 40(11), 2599–2610. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2013.05.007>
- Rinchi, M., Pugi, L., Bartolini, F., & Gozzi, L. (2010). Design of control system to prevent forklift capsizes. *International Journal of Vehicle Systems Modelling and Testing*, 5(1), 35–58. <https://doi.org/10.1504/IJVSMT.2010.033730>
- Sáez-Más, A., García-Sabater, J. P., Llorca, J. M., & Maheut, J. (2016). Assembly plant simulation to support decision-making on Layout Design considering safety issues. A case study. *WPOM-Working Papers on Operations Management*, 7(2), 64–88.

- Saez-Mas, A., Garcia-Sabater, J. P., & Morant-Llorca, J. (2018). Using 4-layer architecture to simulate product and information flows in manufacturing systems. *International Journal of Simulation Modelling*, 17(1), 30–41. [https://doi.org/10.2507/IJSIMM17\(1\)408](https://doi.org/10.2507/IJSIMM17(1)408)
- Saez-Mas, Aida, Garcia-Sabater, J. J., Garcia-Sabater, J. P., & Maheut, J. (2018). Hybrid approach of discrete event simulation integrated with location search algorithm in a cells assignment problem: a case study. *Central European Journal of Operations Research*, 1–18. <https://doi.org/10.1007/s10100-018-0548-5>
- Saez-Mas, Aida, Garcia-Sabater, J. P., & Morant-Llorca, J. (2018). Using 4-Layer architecture to simulate product and information flows in manufacturing. *International Journal of Simulation Modelling*, 17(1), 30–41. [https://doi.org/10.2507/IJSIMM17\(1\)408](https://doi.org/10.2507/IJSIMM17(1)408)
- Saez-Mas, Aida, Garcia-Sabater, J. P., Morant-Llorca, J., & Maheut, J. (2016). Data-driven simulation methodology using DES 4-layer architecture. *Working Papers on Operations Management*, 7(1), 22–30. <https://doi.org/10.4995/wpom.v7i1.4727>
- Sáez Más, A., García Sabater, J. P., Saez Mas, A., Garcia-Sabater, J. P., Saez-Mas, A., & Garcia-Sabater, J. P. (2016). Protocol: Material flow risk evaluation for layout design. *Working Papers on Operations Management*, 7(2), 43–63. <https://doi.org/10.4995/wpom.v7i2.5710>
- Sali, M., & Sahin, E. (2016). Line feeding optimization for Just in Time assembly lines: An application to the automotive industry. *International Journal of Production Economics*, 174, 54–67. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.01.009>
- Sali, M., Sahin, E., & Patchong, A. (2015). An empirical assessment of the performances of three line feeding modes used in the automotive sector: line stocking vs. kitting vs. sequencing. *International Journal of Production Research*, 53(5), 1439–1459. <https://doi.org/10.1080/00207543.2014.944630>
- Satoglu, S. I., & Sahin, I. E. (2013). Design of a just-in-time periodic material supply system for the assembly lines and an application in electronics industry. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 65(1–4), 319–332. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4171-7>
- Satoglu, S. I., & Sipahioglu, A. (2018). an Assignment Based Modelling Approach for the Inventory Routing Problem of Material Supply Systems of the Assembly Lines. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 36(1), 161–177.
- Savino, M. M., & Mazza, A. (2015). Kanban-driven parts feeding within a semi-automated O-shaped assembly line: a case study in the automotive industry. *Assembly Automation*, 35(1), 3–15. <https://doi.org/10.1108/AA-07-2014-068>

- Seebacher, G., Winkler, H., & Oberegger, B. (2015). In-Plant Logistics Efficiency Valuation Using Discrete Event Simulation. *International Journal of Simulation Modelling*, 14, 60–70. [https://doi.org/10.2507/IJSIMM14\(1\)6.289](https://doi.org/10.2507/IJSIMM14(1)6.289)
- Selcuk Kilic, H., & Bulent Durmusoglu, M. (2012). Design of kitting system in lean-based assembly lines. *Assembly Automation*, 32(3), 226–234. <https://doi.org/10.1108/01445151211244357>
- Shariatzadeh, N., Sivard, G., Chen, D., Shariatzadeh N., Sivard G., C. D., Shariatzadeh, N., Sivard, G., ... Chen, D. (2012). Software evaluation criteria for rapid factory layout planning, design and simulation. *Procedia CIRP*, 3(1), 299–304. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2012.07.052>
- Shi, W., Liu, Z., Shang, J., & Cui, Y. (2013). Multi-criteria robust design of a JIT-based cross-docking distribution center for an auto parts supply chain. *EUROPEAN JOURNAL OF OPERATIONAL RESEARCH*, 229(3), 695–706. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.03.013>
- Sianesi, A. (1998). An analysis of the impact of plant and management variables in a multi-stage, mixed-model production system. *INTERNATIONAL JOURNAL OF PRODUCTION ECONOMICS*, 56–7, 575–585. [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(98\)00068-1](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(98)00068-1)
- Sly, D., Grajo, E., & Montreuil, B. (1996). Layout design and analysis software. *IIE Solutions*, 28(7), 18–25. Retrieved from <http://goo.gl/cQ7NMx>
- Son, Y. J., & Wysk, R. A. (2001). Automatic simulation model generation simulation-based, real-time shop floor control. *Computer in Industry*, 45, 291–308.
- Staab, T., Klenk, E., Galka, S., & Guenther, W. A. (2016). Efficiency in in-plant milk-run systems-The influence of routing strategies on system utilization and process stability. *Journal of Simulation*, 10(2, SI), 137–143. <https://doi.org/10.1057/jos.2015.6>
- Staab, T., Klenk, E., Galka, S., Günthner, W. A., & Guenther, W. A. (2016). Efficiency in in-plant milk-run systems—The influence of routing strategies on system utilization and process stability. *Journal of Simulation*, 10(2, SI), 137–143. <https://doi.org/10.1057/jos.2015.6>
- Staab, T., Röschinger, M., Dewitz, M., & Günthner, W. A. (2015). MODELLING AND SIMULATING THE ASSEMBLY LINE SUPPLY BY TUGGER TRAINS. *The International Workshop on Applied Modeling and Simulation*, (c), 22–31.
- Sternatz, J. (2015). The joint line balancing and material supply problem. *INTERNATIONAL JOURNAL OF PRODUCTION ECONOMICS*, 159(SI), 304–318. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.07.022>
- Stoan, L. (2018). New performance drives in automotive industry. *Quality - Access to Success*, 19(S1), 530–536.

- Swietlik, W. (2013). (papel) Next generation of dock safety equipment. *Occupational Health & Safety*, 82(9), 80,82,84. Retrieved from <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84893065340&partnerID=40&md5=116e2e3302dc038eb5d2e4a6f52165bb>
- Sylla, N., Bonnet, V., Colledani, F., & Fraise, P. (2014). Ergonomic contribution of ABLE exoskeleton in automotive industry. *INTERNATIONAL JOURNAL OF INDUSTRIAL ERGONOMICS*, 44(4), 475–481. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2014.03.008>
- Tannock, J., Cao, B., Farr, R., & Byrne, M. (2007). Data driven simulation of the supply chain insights from the aerospace sector. *International Journal of Production Economics*.
- Taylor, P., Hanson, R., & Medbo, L. (2012). Kitting and time efficiency in manual assembly. *International Journal of Production Research*, 50(4), 1115–1125. <https://doi.org/10.1080/00207543.2011.555786>
- Tjahjono, B., & Fernández, R. (2008). Practical approach to experimentation in a simulation study. *Proceedings of the 40th Conference on Winter Simulation*, 1981–1988. <https://doi.org/10.1109/wsc.2008.4736292>
- Tompkins, J., White, J., Bozer, Y., & Tanchoco., J. (2003). *Facilities Planning*. John Wiley & Sons, New York.
- Torabi, S. A., & Jenabi, M. (2009). Multiple cycle economic lot and delivery-scheduling problem in a two-echelon supply chain. *INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY*, 43(7–8), 785–798. <https://doi.org/10.1007/s00170-008-1752-6>
- Usta, S. K., Oksuz, M. K., & Durmusoglu, M. B. (2017). Design methodology for a hybrid part feeding system in lean-based assembly lines. *ASSEMBLY AUTOMATION*, 37(1), 84–102. <https://doi.org/10.1108/AA-09-2016-114>
- Vonolfen, S., Kofler, M., Beham, A., Affenzeller, M., & Achleitner, W. (2012). Optimizing assembly line supply by integrating warehouse picking and forklift routing using simulation. *Proceedings - Winter Simulation Conference*. <https://doi.org/10.1109/WSC.2012.6465077>
- Vukovic, A., Ikonc, M., & Mikac, T. (2009). Entity Ordering Optimization Process Using Virtual Environment. *STROJARSTVO*, 51(1), 63–72.
- Wagner, D. W., Kirschweng, R. L., & Reed, M. P. (2009). Foot motions in manual material handling transfer tasks: A taxonomy and data from an automotive assembly plant. *ERGONOMICS*, 52(3), 362–383. <https://doi.org/10.1080/00140130802376034>
- Wagner, S. M., & Silveira-Camargos, V. (2011). Decision model for the application of just-in-sequence. *INTERNATIONAL JOURNAL OF PRODUCTION RESEARCH*, 49(19), 5713–5736. <https://doi.org/10.1080/00207543.2010.505216>
-

- Wang, C., Guan, Z., Shao, X., & Ullah, S. (2014). Simulation-based optimisation of logistics distribution system for an assembly line with path constraints. *INTERNATIONAL JOURNAL OF PRODUCTION RESEARCH*, 52(12), 3538–3551. <https://doi.org/10.1080/00207543.2013.874602>
- Wang, J., Chang, Q., Xiao, G., Wang, N., & Li, S. (2011). Data driven production modeling and simulation of complex automobile general assembly plant. *Computers in Industry*, 62(7), 765–775. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2011.05.004>
- Wänström, C., & Medbo, L. (2009). The impact of materials feeding design on assembly process performance. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 20, 30–51. <https://doi.org/10.1108/17410380910925398>
- Wy, J., Jeong, S., Kim, B. I., Park, J., Shin, J., Yoon, H., & Lee, S. (2011). A data-driven generic simulation model for logistics-embedded assembly manufacturing lines. *Computers and Industrial Engineering*, 60(1), 138–147. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2010.10.011>
- Yuen, K. K., Choi, S. H., & Yang, X. B. (2010). A full-immersive CAVE-based VR simulation system of forklift truck operations for safety training. *Computer-Aided Design and Applications*, 7(2), 235–245. <https://doi.org/10.3722/cadaps.2010.235-245>
- Zammori, F., Braglia, M., & Castellano, D. (2016). Just-in-time parts feeding policies for paced assembly lines: Possible solutions for highly constrained layouts. *International Transactions in Operational Research*, 23(4), 691–724. <https://doi.org/10.1111/itor.12173>
- Zenker, M., Emde, S., & Boysen, N. (2016). Cyclic inventory routing in a line-shaped network. *EUROPEAN JOURNAL OF OPERATIONAL RESEARCH*, 250(1), 164–178. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.10.067>
- Zhang, M., Batta, R., & Nagi, R. (2009). Modeling of Workflow Congestion and Optimization of Flow Routing in a Manufacturing/Warehouse Facility. *Management Science*, 55(2), 267–280. <https://doi.org/10.1287/mnsc.1080.0916>
- Zhang, M., Batta, R., & Nagi, R. (2010). Material handling delivery in the presence of varying speed and interruptions. *IIE Annual Conference and Expo 2010 Proceedings*.
- Zhang, Min, Batta, R., & Nagi, R. (2009). Modeling of Workflow Congestion and Optimization of Flow Routing in a Manufacturing/Warehouse Facility. *Management Science*, 55(2), 267–280. <https://doi.org/10.1287/mnsc.1080.0916>

- Zhang, Min, Batta, R., & Nagi, R. (2011). Designing manufacturing facility layouts to mitigate congestion. *IIE Transactions (Institute of Industrial Engineers)*, 43(10), 689–702. <https://doi.org/10.1080/0740817X.2010.546386>
- Zhang, S., Shah, H., & Baliga, B. (2016). Material delivery transformation of a freezer plant. *Proceedings of the American Society for Engineering Management*, 196–205. Retrieved from http://exlibris.upv.es:3410/sfxlcl41?sid=Elsevier:Scopus&_service_type=getFullText&issn=&isbn=&volume=&issue=&spage=&epage=&pages=&artnum=&date=2016&id=doi:&title=2016+International+Annual+Conference+of+the+American+Society+for+Engineering+Management%2C+AS
- Zheng, Y., He, C., & Xue, L. (2014). Production Pulling and Line Feeding Service for Automotive Assembly. In Wang, G and Wang, H and Zhang, X (Ed.), *PROGRESS IN MANUFACTURING AUTOMATION TECHNOLOGY AND APPLICATION* (pp. 325–330). <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.579-580.325>
- Zhou, Bing-hai, & Tan, F. (2018). Electric vehicle handling routing and battery swap station location optimisation for automotive assembly lines. *INTERNATIONAL JOURNAL OF COMPUTER INTEGRATED MANUFACTURING*, 31(10), 978–991. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2018.1493229>
- Zhou, Binghai, & Peng, T. (2017). Scheduling the in-house logistics distribution for automotive assembly lines with just-in-time principles. *Assembly Automation*, 37(1), 51–63. <https://doi.org/10.1108/AA-04-2016-028>
- Zhuang, L., Wong, Y. S., Fuh, J. Y. H., & Yee, C. Y. (1998). On the role of a queueing network model In the design of a complex assembly system. *ROBOTICS AND COMPUTER-INTEGRATED MANUFACTURING*, 14(2), 153–161. [https://doi.org/10.1016/S0736-5845\(97\)00023-9](https://doi.org/10.1016/S0736-5845(97)00023-9)
- Zhuo, L., Chua Kim Huat, D., & Wee, K. H. (2012). Scheduling dynamic block assembly in shipbuilding through hybrid simulation and spatial optimisation. *International Journal of Production Research*, 50(20), 5986–6004. <https://doi.org/10.1080/00207543.2011.639816>
- Zupan, H., Herakovic, N., & Starbek, M. (2016). Hybrid Algorithm Based on Priority Rules for Simulation of Workshop Production. *International Journal of Simulation Modelling*, 15(1), 29–41. [https://doi.org/10.2507/IJSIMM15\(1\)3.319](https://doi.org/10.2507/IJSIMM15(1)3.319)

