

Trabajo Fin de Máster
Máster en Organización Industrial y Gestión de
Empresas

Algoritmo de recocido simulado para la mejora de la
eficiencia de una terminal intermodal

Autor: Manuel Cuberos Gallardo

Tutor: Dr. Alejandro Escudero Santana

Dep. Organización Industrial y Gestión de Empresas II
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2015



Trabajo Fin de Máster
Máster en Organización Industrial y Gestión de Empresas

Algoritmo de recocido simulado para la mejora de la eficiencia de una terminal intermodal

Autor:

Manuel Cuberos Gallardo

Tutor:

Alejandro Escudero Santana

Profesor ayudante doctor

Dep. de Organización Industrial y Gestión de Empresas II

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2015

Trabajo Fin de Máster: Algoritmo de recocido simulado para la mejora de la eficiencia de una terminal intermodal

Autor: Manuel Cuberos Gallardo

Tutor: Alejandro Escudero Santana

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2015

El Secretario del Tribunal

Resumen

El transporte intermodal es un método de organizar el transporte de mercancías consistente en realizar los envíos empleando varios modos de transporte pero cargando una única unidad de carga. Esto permite reducir el tiempo que debe pasar la mercancía en las terminales, agilizando toda la cadena de transporte. Sin embargo, para conseguir que el transporte intermodal sea eficiente, es necesaria la planificación de las diversas etapas que la componen: el trayecto principal, en buque o tren, que se encarga de cubrir grandes distancias; el acarreo terrestre, que permite conectar la terminal intermodal con su hinterland, y el intercambio intermodal. Esta etapa consiste en cambiar el modo de transporte de la mercancía en la terminal.

El intercambio intermodal es un proceso compuesto por muchas operaciones diferentes. Sin embargo, muchas de las ellas comparten recursos como maquinaria, personal, espacio, etc. por lo que el mejor enfoque para gestionar el intercambio intermodal es integrando varias de esas operaciones.

El presente trabajo pretende ofrecer un método para mejorar la eficiencia de una terminal intermodal a partir de la sincronización de los procesos de descarga y carga de buques y trenes, lo que se consigue programando las grúas encargadas de dichos procesos. Con ello se consigue reducir el tiempo que pasan los contenedores en la terminal, así como el tiempo que pasan los buques y los trenes esperando a ser cargados en la terminal.

Para resolver la problemática presentada se ha desarrollado un algoritmo basado en la heurística de recocido simulado. Dicha heurística, inspirada en el proceso de recocido del acero para conseguir material recristalizado con baja energía interna, ha servido como base para el desarrollo de algoritmos para la resolución de diversos problemas de optimización. La principal particularidad del algoritmo de recocido simulado es su comportamiento convergente al óptimo del problema si está correctamente parametrizado, lo que se consigue gracias a la capacidad de escapar de óptimos locales propia de la heurística.

Con el fin de demostrar la validez del algoritmo se ha desarrollado una batería de problemas de aplicación. Los resultados obtenidos han corroborado el buen comportamiento del algoritmo de recocido simulado ante el problema de sincronización y programación de grúas.

Resumen	vi
Índice	viii
Índice de Tablas	x
Índice de Figuras	xv
Glosario	xvi
1 Introducción y Objetivos	17
1.1 <i>Antecedentes y contexto</i>	17
1.2 <i>Objetivo del trabajo</i>	19
1.3 <i>Contenido del trabajo</i>	19
2 Las terminales de contenedores	20
2.1 <i>Tipos de terminales intermodales</i>	21
2.1.1 Puertos secos	21
2.1.2 Terminales portuarias de contenedores	22
2.2 <i>Elementos de las terminales portuarias de contenedores</i>	23
2.2.1 Los contenedores de mercancía	24
2.2.2 Zonas de una terminal portuaria de contenedores	25
2.2.3 Equipos de una terminal portuaria de contenedores	26
2.3 <i>Servicios ofrecidos por una terminal portuaria de contenedores</i>	31
2.3.1 Carga y descarga de buques	31
2.3.2 Almacenamiento de mercancía	31
2.3.3 Cambio del modo de transporte	31
3 Operativas en una terminal de contenedores portuaria	32
3.1 <i>Operativa del buque</i>	33
3.1.1 El problema de asignación de muelles	33
3.1.2 La planificación de la estiba dentro del buque	35
3.1.3 Problema de programación de grúas pórtico	37
3.2 <i>Operativa de almacenamiento y apilado</i>	38
3.2.1 La localización de los contenedores en la zona de almacenaje	38
3.2.2 La relocalización de contenedores en la zona de almacenaje	40
3.3 <i>Operativa de transferencia</i>	42
3.3.1 El transporte en muelles	42
3.3.2 El transporte terrestre	44
3.3.3 La programación de las grúas	45
4 El problema de secuenciación y programación de grúas	48
4.1 <i>Definición del problema</i>	49
4.2 <i>Formulación conceptual del problema</i>	50
4.2.1 Consideraciones y simplificaciones del problema	50
4.2.2 Variables de la planificación	51
4.2.3 Función objetivo	52
4.2.4 Restricciones del problema	52
4.3 <i>Ejemplo conceptual</i>	53

5	Metodología: El recocido simulado	56
5.1	<i>Introducción a la heurística de Recocido Simulado</i>	57
5.2	<i>El recocido simulado en problemas de optimización</i>	59
5.3	<i>Adaptación del recocido simulado al problema de secuenciación y programación de grúas</i>	60
5.3.1	Parámetros del algoritmo	61
5.3.2	Funcionamiento del algoritmo	62
5.3.3	Codificación de la solución	64
6	Resultados	66
6.1	<i>Batería de problemas</i>	66
6.2	<i>Resultados</i>	69
7	Conclusiones	73
8	Referencias bibliográficas	75
	Anexo I. Batería de problemas	82
	Anexo II. Resultados de la batería de problemas	90
	Anexo III. Parametrización	143
	<i>Función de enfriamiento</i>	143
	<i>Temperatura inicial y temperatura final</i>	144
	<i>Longitud de la cadena</i>	145
	<i>Tamaño del vecindario</i>	146

Índice de Tablas

Tabla 1. Tipos de contenedores	25
Tabla 2. Dimensiones de los principales tipos de contenedores	25
Tabla 3. Datos de entrada del problema	53
Tabla 4. Programación de grúas priorizando descargas	54
Tabla 5. Instantes de salida priorizando descargas	54
Tabla 6. Programación de grúas priorizando cargas	55
Tabla 7. Instantes de salida priorizando cargas	55
Tabla 8 Analogía entre el algoritmo original y su adaptación a problemas de optimización	61
Tabla 9. Probabilidades de aceptar nueva solución	63
Tabla 10. Codificación de la solución de los buques	64
Tabla 11. Codificación de la solución de los trenes	65
Tabla 12. Programación de una grúa de buque	65
Tabla 13. Escenarios de la batería de problemas	67
Tabla 14. Representación de solución de los buques	68
Tabla 15. Representación de solución de los trenes	68
Tabla 16. Asignación de tareas a la grúa de buque 1	68
Tabla 17. Asignación de tareas a la grúa de buque 2	68
Tabla 18. Asignación de tareas a la grúa de buque 3	69
Tabla 19. Asignación de tareas a la grúa de tren 1	69
Tabla 20. Asignación de tareas a la grúa de tren 2	69
Tabla 21. Asignación de tareas a la grúa de tren 3	69
Tabla 22. Parámetros del algoritmo	70
Tabla 23. Comparativa de resultados	70
Tabla 24. Entradas de buques y trenes para los escenarios 1 a 4	82
Tabla 25. Grúas disponibles en el escenario 1	82
Tabla 26. Grúas disponibles en el escenario 2	82
Tabla 27. Grúas disponibles en el escenario 3	83
Tabla 28. Grúas disponibles en el escenario 4	83
Tabla 29. Entradas de buques y trenes en los escenarios 5 a 8	84
Tabla 30. Grúas disponibles en el escenario 5	84
Tabla 31. Grúas disponibles en el escenario 6	84
Tabla 32. Grúas disponibles en el escenario 7	84
Tabla 33. Grúas disponibles en el escenario 8	85
Tabla 34. Entradas de buques y trenes en los escenarios 9 a 12	86

Tabla 35. Grúas disponibles en el escenario 9	86
Tabla 36. Grúas disponibles en el escenario 10	86
Tabla 37. Grúas disponibles en el escenario 11	86
Tabla 38. Grúas disponibles en el escenario 12	87
Tabla 39. Entrada de buques y trenes en los escenarios 13 a 16	88
Tabla 40. Grúas disponibles en el escenario 13	88
Tabla 41. Grúas disponibles en el escenario 14	89
Tabla 42. Grúas disponibles en el escenario 15	89
Tabla 43. Grúas disponibles en el escenario 16	89
Tabla 44. Solución buques. Escenario 1	90
Tabla 45. Solución trenes. Escenario 1	90
Tabla 46. Configuración grúa de buque 1. Escenario 1	90
Tabla 47. Configuración grúa de tren 1. Escenario 1	91
Tabla 48. Solución del problema 1	91
Tabla 49. Solución buques. Escenario 2	92
Tabla 50. Solución trenes. Escenario 2	92
Tabla 51. Configuración grúa de buque 1. Escenario 2	92
Tabla 52. Configuración grúa de buque 2. Escenario 2	92
Tabla 53. Configuración grúa de tren 1. Escenario 2	93
Tabla 54. Configuración grúa de tren 2. Escenario 2	93
Tabla 55. Solución del problema 2	93
Tabla 56. Solución buques. Escenario 3	94
Tabla 57. Solución trenes. Escenario 3	94
Tabla 58. Configuración grúa de buque 1. Escenario 3	94
Tabla 59. Configuración grúa de buque 2. Escenario 3	94
Tabla 60. Configuración grúa de buque 3. Escenario 3	95
Tabla 61. Configuración grúa de tren 1. Escenario 3	95
Tabla 62. Configuración grúa de tren 2. Escenario 3	95
Tabla 63. Configuración grúa de tren 3. Escenario 3	95
Tabla 64. Solución del problema 3	96
Tabla 65. Solución buques. Escenario 4	97
Tabla 66. Solución trenes. Escenario 4	97
Tabla 67. Configuración grúa de buque 1. Escenario 4	97
Tabla 68. Configuración grúa de buque 2. Escenario 4	97
Tabla 69. Configuración grúa de buque 3. Escenario 4	98
Tabla 70. Configuración grúa de buque 4. Escenario 4	98
Tabla 71. Configuración grúa de tren 1. Escenario 4	98
Tabla 72. Configuración grúa de tren 2. Escenario 4	98
Tabla 73. Configuración grúa de tren 3. Escenario 4	99

Tabla 74. Configuración grúa de tren 4. Escenario 4	99
Tabla 75. Solución del problema 4	99
Tabla 76. Solución buques. Escenario 5	100
Tabla 77. Solución trenes. Escenario 5	100
Tabla 78. Configuración grúa de buque 1. Escenario 5	100
Tabla 79. Configuración grúa de tren 1. Escenario 5	101
Tabla 80. Solución del problema 5	101
Tabla 81. Solución buques. Escenario 6	102
Tabla 82. Solución trenes. Escenario 6	102
Tabla 83. Configuración grúa de buque 1. Escenario 6	102
Tabla 84. Configuración grúa de buque 2. Escenario 6	102
Tabla 85. Configuración grúa de tren 1. Escenario 6	103
Tabla 86. Configuración grúa de tren 2. Escenario 6	103
Tabla 87. Solución del problema 5	103
Tabla 88. Solución buques. Escenario 7	104
Tabla 89. Solución trenes. Escenario 7	104
Tabla 90. Configuración grúa de buque 1. Escenario 7	104
Tabla 91. Configuración grúa de buque 2. Escenario 7	104
Tabla 92. Configuración grúa de buque 3. Escenario 7	105
Tabla 93. Configuración grúa de tren 1. Escenario 7	105
Tabla 94. Configuración grúa de tren 2. Escenario 7	105
Tabla 95. Configuración grúa de tren 3. Escenario 7	105
Tabla 96. Solución del problema 7	106
Tabla 97. Solución buques. Escenario 8	107
Tabla 98. Solución trenes. Escenario 8	107
Tabla 99. Configuración grúa de buque 1. Escenario 8	107
Tabla 100. Configuración grúa de buque 2. Escenario 8	107
Tabla 101. Configuración grúa de buque 3. Escenario 8	108
Tabla 102. Configuración grúa de buque 4. Escenario	108
Tabla 103. Configuración grúa de tren 1. Escenario 8	108
Tabla 104. Configuración grúa de tren 2. Escenario 8	108
Tabla 105. Configuración grúa de tren 3. Escenario 8	109
Tabla 106. Configuración grúa de tren 4. Escenario 8	109
Tabla 107. Solución del problema 8	109
Tabla 108. Solución buques. Escenario 9	110
Tabla 109. Solución trenes. Escenario 9	110
Tabla 110. Configuración grúa de buque 1. Escenario 9	111
Tabla 111. Configuración grúa de tren 1. Escenario 9	112
Tabla 112. Solución del problema 9	112

Tabla 113. Solución buques. Escenario 10	113
Tabla 114. Solución trenes. Escenario 10	113
Tabla 115. Configuración grúa de buque 1. Escenario 10	114
Tabla 116. Configuración grúa de buque 2. Escenario 10	114
Tabla 117. Configuración grúa de tren 1. Escenario 10	115
Tabla 118. Configuración grúa de tren 2. Escenario 10	115
Tabla 119. Solución del problema 10	115
Tabla 120. Solución buques. Escenario 11	116
Tabla 121. Solución trenes. Escenario 11	116
Tabla 122. Configuración grúa de buque 1. Escenario 11	117
Tabla 123. Configuración grúa de buque 2. Escenario 11	117
Tabla 124. Configuración grúa de buque 3. Escenario 11	118
Tabla 125. Configuración grúa de tren 1. Escenario 11	118
Tabla 126. Configuración grúa de tren 2. Escenario 11	118
Tabla 127. Configuración grúa de tren 3. Escenario 11	119
Tabla 128. Solución del problema 11	119
Tabla 129. Solución buques. Escenario 12	120
Tabla 130. Solución trenes. Escenario 12	120
Tabla 131. Configuración grúa de buque 1. Escenario 12	121
Tabla 132. Configuración grúa de buque 2. Escenario 12	121
Tabla 133. Configuración grúa de buque 3. Escenario 12	121
Tabla 134. Configuración grúa de buque 4. Escenario 12	121
Tabla 135. Configuración grúa de tren 1. Escenario 12	122
Tabla 136. Configuración grúa de tren 2. Escenario 12	122
Tabla 137. Configuración grúa de tren 3. Escenario 12	122
Tabla 138. Configuración grúa de tren 4. Escenario 12	122
Tabla 139. Solución del problema 12	122
Tabla 140. Solución buques. Escenario 13	123
Tabla 141. Solución trenes. Escenario 13	124
Tabla 142. Configuración grúa de buque 1. Escenario 13	125
Tabla 143. Configuración grúa de tren 1. Escenario 13	127
Tabla 144. Solución del problema 13	127
Tabla 145. Solución buques. Escenario 14	128
Tabla 146. Solución trenes. Escenario 14	129
Tabla 147. Configuración grúa de buque 1. Escenario 14	129
Tabla 148. Configuración grúa de buque 2. Escenario 14	130
Tabla 149. Configuración grúa de tren 1. Escenario 14	131
Tabla 150. Configuración grúa de tren 2. Escenario 14	132
Tabla 151. Solución buques. Escenario 15	133

Tabla 152. Solución trenes. Escenario 15	134
Tabla 153. Configuración grúa de buque 1. Escenario 15	134
Tabla 154. Configuración grúa de buque 2. Escenario 15	135
Tabla 155. Configuración grúa de buque 3. Escenario 15	135
Tabla 156. Configuración grúa de tren 1. Escenario 15	136
Tabla 157. Configuración grúa de tren 2. Escenario 15	137
Tabla 158. Configuración grúa de tren 3. Escenario 15	137
Tabla 159. Solución del problema 15	137
Tabla 160. Solución buques. Escenario 16	138
Tabla 161. Solución trenes. Escenario 16	139
Tabla 162. Configuración grúa de buque 1. Escenario 16	139
Tabla 163. Configuración grúa de buque 2. Escenario 16	140
Tabla 164. Configuración grúa de buque 3. Escenario 16	140
Tabla 165. Configuración grúa de buque 4. Escenario 16	140
Tabla 166. Configuración grúa de tren 1. Escenario 16	141
Tabla 167. Configuración grúa de tren 2. Escenario 16	141
Tabla 168. Configuración grúa de tren 3. Escenario 16	142
Tabla 169. Configuración grúa de tren 4. Escenario 16	142
Tabla 170. Solución del problema 16	142
Tabla 171. Resultados para la parametrización β	144
Tabla 172. Parametrización β	144
Tabla 173. Parametrización t_0 y t_{\min}	144
Tabla 174. Resultados para la parametrización L	145
Tabla 175. Parametrización L	145
Tabla 176. Resultados para la parametrización de Tvec	146
Tabla 177. Parametrización Tvec	146

Índice de Figuras

Figura 1. Evolución comercio contenedorizado mundial, 1996-2014	18
Figura 2. Tráfico de carga en las principales rutas del comercio contenedorizado, 1995-2013	18
Figura 3. Etapas del transporte intermodal	21
Figura 4. Puerto Seco de Madrid	22
Figura 5. Tráfico de contenedores en los principales puertos del mundo	23
Figura 6. Puerto de Rotterdam	23
Figura 7. Zonas de una terminal portuaria	26
Figura 8 Grúa pórtico	27
Figura 9. Grúas polivalentes en el puerto de Bilbao	27
Figura 10. Grúa pórtico de almacenamiento	28
Figura 11. Carretilla pórtico	28
Figura 12. Cargador frontal	29
Figura 13. Grúa apiladora	29
Figura 14. Camión con plataforma	30
Figura 15. Camión multi-plataforma	30
Figura 16. Vehículo autoguiado	31
Figura 17. Operaciones en una terminal portuaria de contenedores	33
Figura 18. Muelle discreto vs muelles continuo	34
Figura 19. Visualización de estiba de un buque	36
Figura 20 Representación del CPMP	41
Figura 21 Movimientos de los AGVs en una terminal	43
Figura 22 Representación de una solución del TTRP	44
Figura 23. Movimientos posibles de grúas de almacenamiento	46
Figura 24. Representación de un proceso de importación de mercancías	49
Figura 25. Pseudocódigo del recocido simulado	58
Figura 26. Visualización del comportamiento convergente del algoritmo	64
Figura 27. Comparativa de resultados	71
Figura 28. Tiempos de computación	72

Glosario

BAP	<i>Berth Allocation Problem</i>
CPMP	<i>Container Pre-Marshalling Problem</i>
DDP	<i>Daily Drayage Problem</i>
GRASP	<i>Greedy Randomized Adaptative Search Procedure</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LTP	<i>Landside Transport Problem</i>
MBPP	<i>Master Bay Planning Problem</i>
NP	No polinomial
QCSP	<i>Quay Crane Scheduling Problem</i>
QTP	<i>Quayside Transport Problem</i>
SA	<i>Simulated Annealing</i>
SPP	<i>Stowage Planning Problem</i>
TEU	<i>Twenty-foot Equivalent Unit</i>
TPC	Terminal Portuaria de Contenedores
TTRP	<i>Truck and Trailer Routing Problem</i>
UNCTAD	<i>United Nations Conference on Trade and Development</i>
UNE	Una Norma Española
VRP	<i>Vehicle Routing Problem</i>
VRPTW	<i>Vehicle Routing Problem with Time Windows</i>
YAP	<i>Yard Allocation Problem</i>
YCSP	<i>Yard Crane Scheduling Problem</i>
ZA	Zona de Almacenamiento

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

El transporte de mercancías es una actividad más que demuestra el creciente proceso de globalización en que se encuentra la sociedad en la actualidad. Hoy en día, largas cadenas de transporte se encargan de conectar todo el mundo con el fin de eliminar barreras geográficas entre la producción y el consumo. A la hora de determinar el modo de transporte, el marítimo es la opción más común para trayectos de larga distancia. Sin embargo, la escasa flexibilidad hace que sea necesario sincronizar los envíos marítimos puerto a puerto con otros modos de transporte como el ferrocarril y el transporte por carretera. Este concepto se conoce como transporte multimodal.

Entre las diferentes formas de llevar a cabo el transporte de mercancías, la de mayor crecimiento es el transporte intermodal, el cual es un modo particular de multimodalidad. Consiste en utilizar diferentes modos de transporte para transportar una misma unidad de carga. Esta particularidad permite reducir el tiempo que debe pasar la mercancía en las terminales intermodales, al sustituir las operaciones de carga y descarga de mercancía de un contenedor a otro, por operaciones de carga y descarga de los propios contenedores entre los diferentes medios de transporte.

Las terminales portuarias de contenedores son esenciales para entender el concepto de transporte de larga distancia de mercancías. En ellas los contenedores deben ser descargados de los buques para posteriormente ser cargados en trenes o camiones para continuar la cadena logística. Esto hace que en las terminales portuarias se desarrollen diferentes operaciones que son esenciales para tratar de agilizar los envíos.

1.1 Antecedentes y contexto

El transporte de mercancías ha ido evolucionando en pos de conseguir hacer llegar cualquier tipo de producto a cualquier lugar del mundo. La especialización de la producción y el abaratamiento del transporte han favorecido dicha evolución. De entre todos los cambios que ha experimentado el transporte de mercancías, el más trascendente fue la aparición de los contenedores

El crecimiento del transporte de contenedores se ha acentuado a medida que el desarrollo económico y tecnológico ha ido permitiendo aumentar la productividad de los puertos. Como se aprecia en la siguiente gráfica, el envío de contenedores lleva décadas creciendo año a año, con la salvedad del año 2009, donde la

crisis mundial trajo consigo una inaudita reducción del comercio de contenedores.

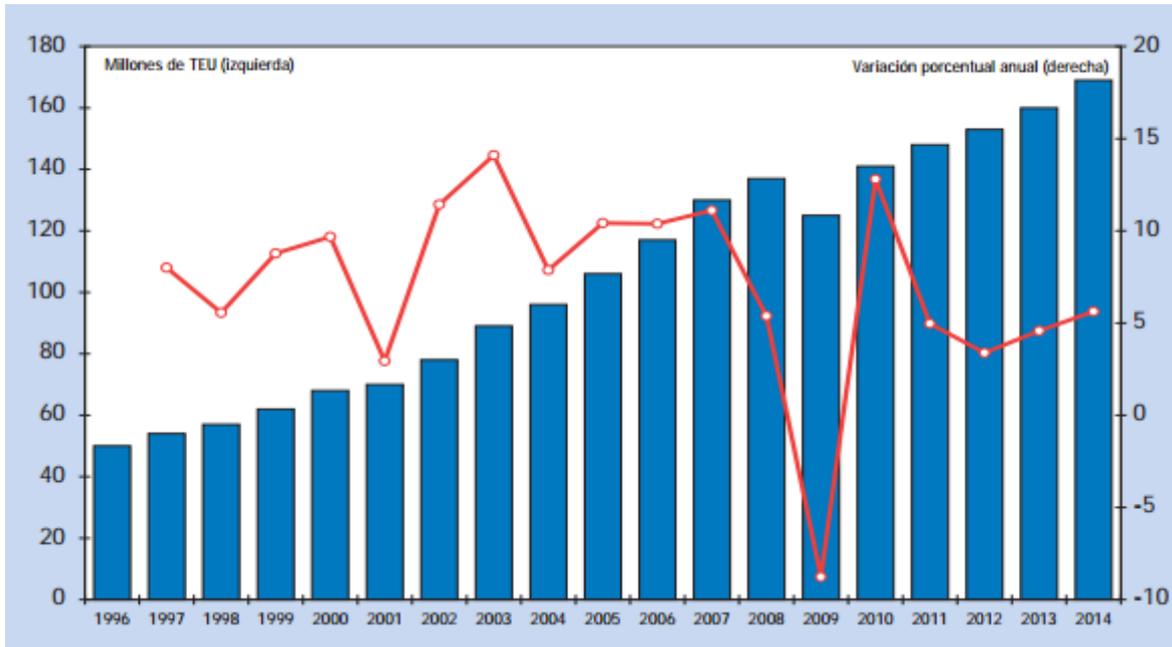


Figura 1. Evolución comercio contenedorizado mundial, 1996-2014

Fuente: UNCTAD 2014

Resulta especialmente llamativa la distribución de las rutas que más han crecido en los últimos años. Entre las tres grandes rutas este-oeste, las que unen Asia con Europa y América, la que más han crecido con mucha diferencia han sido las que conectan Asia (centro manufacturero) con Asia y América (consumidores), siendo mucho menor el crecimiento del transporte de contenedores entre Europa y América. .

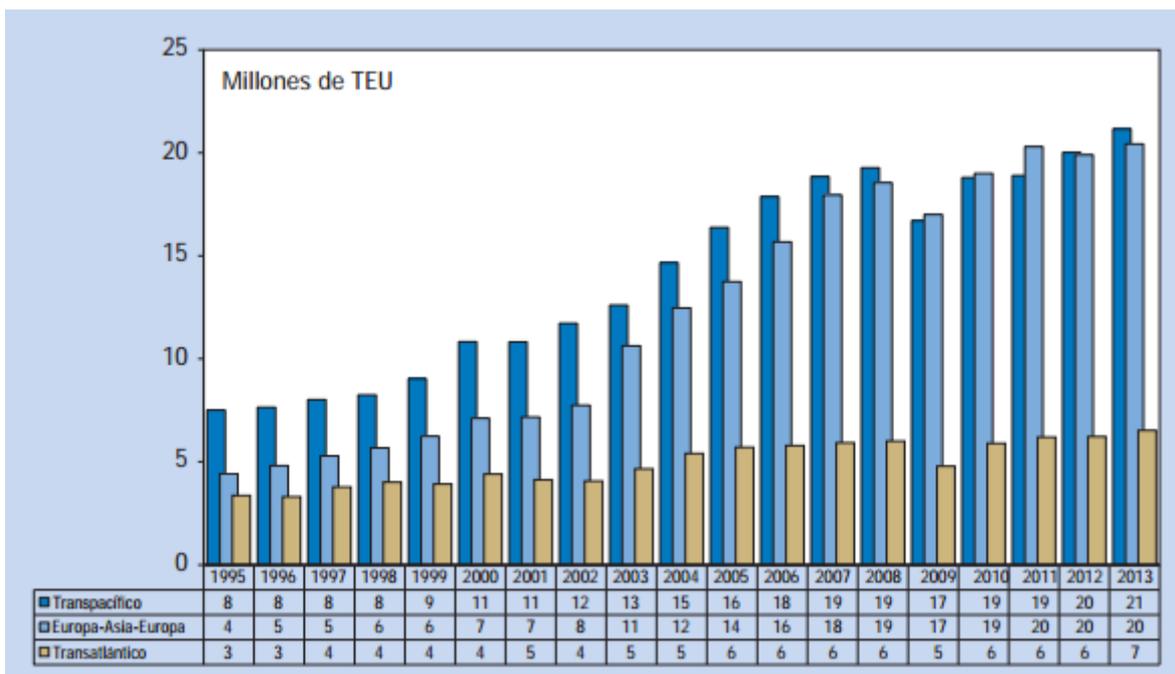


Figura 2. Tráfico de carga en las principales rutas del comercio contenedorizado, 1995-2013

Fuente: UNCTAD 2014

1.2 Objetivo del trabajo

El crecimiento de la intermodalidad como forma de transporte de mercancías hace que la gestión eficiente de las terminales intermodales sea imprescindible. El intercambio del modo de transporte de la mercancía es un proceso complejo que depende de muchos factores diferentes, lo que dificulta la planificación de las operaciones necesarias para dichos intercambios. Estas operaciones guardan fuerte relación las unas con las otras. Este aspecto, unido a la necesidad de gestionar todas ellas para conseguir optimizar la etapa de cambio de modo de transporte, sugiere enfocar el problema integrando diferentes operativas.

En concreto, se pretende agilizar el proceso de descarga de buques y posterior carga de trenes, y viceversa. Este problema incluye por un lado la asignación de recursos a los distintos buques y trenes, y por otro la programación de las grúas disponibles en la terminal de contenedores. Para resolver el problema se ha llevado a cabo una adaptación al problema de la heurística del recocido simulado, empleada en una gran variedad de problemas de optimización.

1.3 Contenido del trabajo

Para contextualizar el trabajo se presenta el concepto de transporte intermodal en el apartado 2. Además, se describen diversos conceptos relacionados con las terminales de contenedores esenciales para contextualizar el trabajo realizado.

En el apartado 3, se lleva a cabo una revisión sobre el estado del arte de las operativas que se dan en las terminales y que hacen posible los intercambios intermodales.

En el apartado 4 se profundiza en el problema a resolver para mejorar la eficiencia en una terminal portuaria de contenedores. En esta sección se detallan las variables del problema, así como las restricciones y la función objetivo.

En el apartado 5 se presenta la heurística del recocido simulado. Se presenta una revisión bibliográfica de diferentes problemas de la literatura que han sido resueltos empleando dicha heurística, y se muestra la adaptación de la misma al problema a resolver.

En el apartado 6 se analizan los resultados obtenidos a partir de una batería de problemas. Dichos resultados son comparados con los ofrecidos por otras heurísticas a la misma batería de problemas, con el fin de determinar la adecuación del algoritmo de recocido simulado al problema de optimización resuelto.

Por último, en el apartado 7 se exponen las conclusiones obtenidas del desarrollo del presente trabajo.

2 LAS TERMINALES DE CONTENEDORES

El transporte intermodal consiste en la articulación entre diferentes modos de transportando empleando una única medida de carga, generalmente contenedores, a fin de realizar de manera más eficiente las operaciones de transbordo de mercancías y materiales. Como definieron (Van Duin y Van Ham 1998) *“el transporte intermodal es el movimiento de bienes en una misma unidad de carga o vehículo, que usa sucesivamente varios modos de transporte sin manejo de los bienes en los cambios de modos”*. En la misma línea, en la literatura también se define el transporte intermodal como *“Transporte en el que dos o más modos son unidos de principio a fin con el objetivo de transportar mercancías o personas de un punto de origen a un punto de destino”* (Southworth y Peterson 2000) y *“envío de mercancías y el movimiento de personas envueltas en más de un modo de transporte durante un viaje simple y sin fisuras”* (Jones, Cassady, y Bowden Jr 2000).

El transporte intermodal suele dividirse en 3 etapas diferenciadas:

- Acarreo terrestre: Se refiere al transporte por carretera de la mercancía hasta la terminal intermodal, ya sea de ferrocarril o portuaria. Esta etapa es la más flexible de toda la cadena de transporte.
- Transbordo en terminal: En las terminales intermodales de origen y de destino, la mercancía debe ser descargada de los camiones, apilada de forma ordenada y posteriormente cargada en el buque o tren encargado del trayecto principal. La aparición de los contenedores fue revolucionaria ya que se consiguieron reducir enormemente los tiempos que debía pasar la mercancía en las terminales.
- Trayecto principal: En ferrocarril o en buque por vía marítima, el trayecto principal cubre grandes distancias entre la terminal de origen y la de destino.

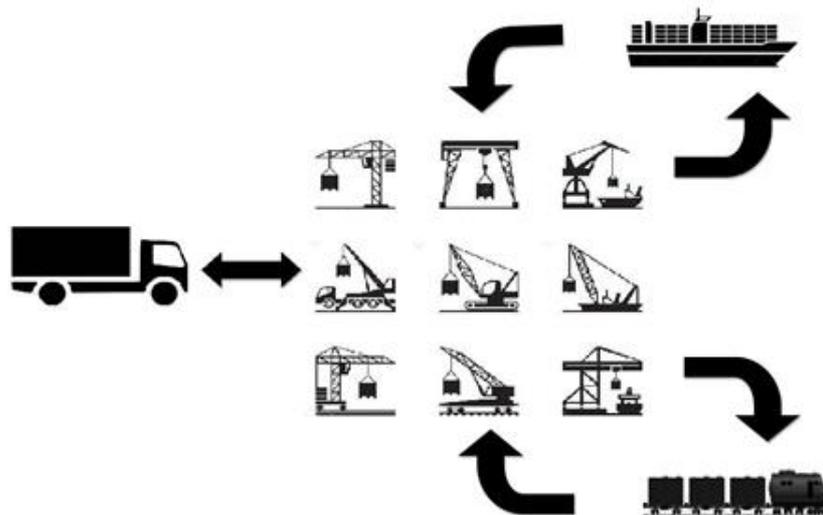


Figura 3. Etapas del transporte intermodal

El transbordo en terminal es la etapa que requiere una mayor sincronización y precisión si se quiere optimizar el envío a lo largo de toda la cadena. Tal y como se concluye en (Ambrosino, Sciomachen, y Tanfani 2004), todas las operaciones a realizar en la terminal deben ser optimizadas con el fin de obtener la máxima eficiencia a lo largo de todo el proceso. Por tanto, es importante optimizar los recursos de los que se dispone en la terminal para agilizar lo máximo posible las operaciones en la misma.

2.1. Tipos de terminales intermodales

Las terminales intermodales se clasifican en dos tipos según la geografía en que se encuentran ubicadas: terminales portuarias, donde se producen las llegadas de buques con contenedores, y terminales de interior, con conexión a transporte ferroviario.

2.1.1 Puertos secos

Un puerto seco es una terminal intermodal situada en el interior de un país o región, que se conecta con uno o varios puertos marítimos a través de la red ferroviaria y por carretera. Suelen ubicarse cerca de grandes ciudades o núcleos de producción. En ellas se produce el intercambio de contenedores entre camiones y trenes. Para ello, los puertos secos necesitan grúas capaces de cargar y descargar trenes, así como de desplazar los contenedores de una zona de la terminal a otra.

En España el más importante es el Puerto Seco de Madrid, llegando a manipular más de 120.000 TEU en 2014 tras haber experimentado un crecimiento exponencial en el presente siglo.



Figura 4. Puerto Seco de Madrid

Fuente: www.puertoseco.com

2.1.2 Terminales portuarias de contenedores

Las terminales portuarias de contenedores se ubican en la costa, o en ríos accesibles a buques cargueros. Se puede definir terminal portuaria como instalación o conjunto de instalaciones destinadas a conectar el modo de transporte marítimo con los diferentes modos terrestres. En la literatura, algunos autores determinan que los puertos no son más que un eslabón más en la cadena del transporte y el comercio, por lo que un uso eficiente de los mismos contribuye al bienestar social al generar excedentes para productores y consumidores (Goss 1990).

Aproximadamente el 46% del tráfico portuario de contenedores de todo el mundo en 2013 estaba representado en los 20 puertos principales. Además, los 10 principales puertos se encuentran en Asia, lo que es un reflejo del papel como importador que tiene el continente en todo el planeta. En Europa, el puerto con mayor tráfico de contenedores se encuentra en Rotterdam (Países Bajos), siendo también grandes puertos internacionales el de Amberes (Bélgica) y Hamburgo (Alemania).

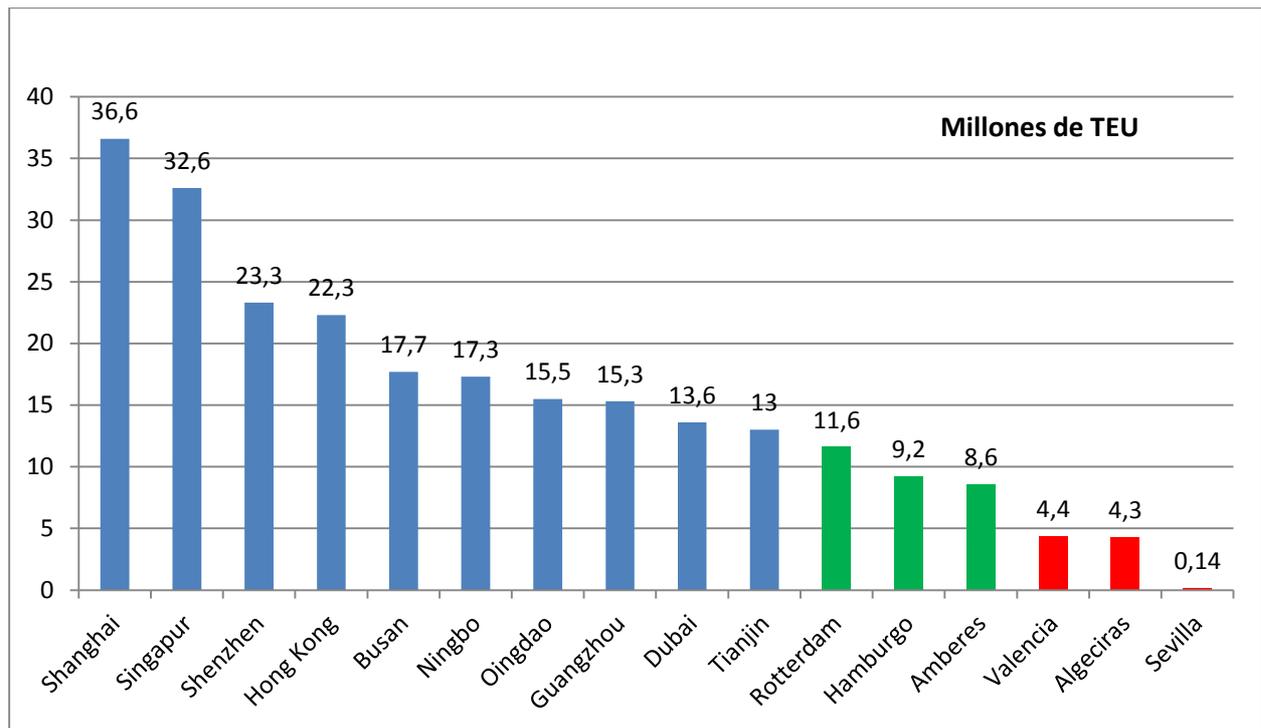


Figura 5. Tráfico de contenedores en los principales puertos del mundo

En la Figura 5 se aprecia fácilmente la enorme diferencia de volumen entre el tráfico que manejan los puertos asiáticos con los europeos, y especialmente con los españoles..



Figura 6. Puerto de Rotterdam

2.2 Elementos de las terminales portuarias de contenedores

La complejidad en la gestión y funcionamiento de una terminal portuaria de contenedores se fundamenta en su papel como centro de intercambio nodal de mercancía. Para que este intercambio se produzca de manera

eficiente es necesario que se desarrollen diferentes procesos, a priori independientes entre sí. Las operaciones a realizar en una terminal requieren el empleo de distintos recursos, como los contenedores, las grúas y demás maquinaria, así como de las diferentes zonas de la terminal.

2.2.1 Los contenedores de mercancía

La aparición del contenedor fue fundamental para el crecimiento del transporte de mercancías en todo el mundo. Antes de ellos, el transporte se hacía en paquetes con diferentes formas, tamaños y pesos, y los procesos de carga y descarga eran muy lentos. Fue el transportista estadounidense Malcolm McLean quien ideó el uso de cajas metálicas para el transporte de sus mercancías con el fin de facilitar los procesos de carga y descarga y evitar rupturas y robos de la mercancía. En 1956 se produjo el primer traslado en buque de 58 contenedores desde New Jersey a Houston. En 1966 se produjo el primer viaje transoceánico, cuando el petrolero Fairland cubrió la ruta Nueva York – Rotterdam cargado con 228 contenedores. Estos primeros contenedores tenían unas dimensiones de 35 pies de longitud, 8 de altura y 8 de anchura. Actualmente estas dimensiones están estandarizadas según la norma ISO 668 y su homóloga UNE 117101:2003. Por ello, los buques portacontenedores y demás medios de transporte de mercancías están estandarizados para optimizar los envíos de contenedores de 20 y de 40 pies. Estas dimensiones dieron paso a una nueva unidad de medida, el TEU, del término inglés *Twenty-foot Equivalent Unit*. Así, los contenedores estandarizados tienen dimensiones de 1 o 2 TEU. Existen además diferentes tipos de contenedores, como se pueden ver resumidos en la Tabla 1.

<p style="text-align: center;">Dry Van o Contenedor Estándar</p> <p>Son los más utilizados para el transporte, y dada su versatilidad pueden ser empleados para casi cualquier tipo de carga.</p> <p>Además de existir de 20 o 40 pies, existe el <i>High Cube</i>, de 40 pies y más alto y con más capacidad que el estándar.</p>	
<p style="text-align: center;">Reefer o Refrigeríficos</p> <p>Son contenedores refrigerados. Empleados sobre todo para el transporte de alimentos, necesitan ir conectados a red eléctrica para mantener baja la temperatura de su interior.</p>	
<p style="text-align: center;">Tank o Cisterna</p> <p>Para transportar líquidos y gases. Es una cisterna con una estructura para que pueda ser manipulada como los dry van.</p>	
<p style="text-align: center;">Flexitank o Tanque Flexible</p> <p>Es una bolsa o tanque flexible de gran tamaño que transforma un contenedor 20 pies convencional en un seguro y eficiente sistema de transporte de líquidos a granel.</p>	

<p style="text-align: center;">Open Side o Lateral Abierto</p> <p>Son usados cuando se requiere acceder a la mercancía a través del lateral del contenedor, generalmente cuando la carga es indivisible a menor tamaño.</p>	
<p style="text-align: center;">Open Top o Techo Abierto</p> <p>Contenedor usado como carga de mercancía voluminosa o que tiene que cargarse por la parte superior.</p>	
<p style="text-align: center;">Flat Rack o Plataforma</p> <p>Se emplean habitualmente cuando la carga es sobredimensionada al tamaño de un contenedor estándar.</p>	

Tabla 1. Tipos de contenedores

Las dimensiones estandarizadas de los principales tipos de contenedores se reflejan en la Tabla 2.

Nombre	Longitud (m)	Anchura (m)	Altura (m)
Contenedor de 20'	6,058	2,438	2,438
Contenedor de 40'	12,192	2,438	2,438
Contenedor High Cube	12,192	2,438	2,591

Tabla 2. Dimensiones de los principales tipos de contenedores

2.2.2 Zonas de una terminal portuaria de contenedores

Las terminales de contenedores suelen ser grandes superficies, con espacio suficiente para que se puedan llevar a cabo las diferentes operaciones que se dan en los puertos. Las principales zonas en las que se divide una terminal portuaria de contenedores son:

- Zona de operaciones de buques: Junto a los muelles donde atracan los barcos, en esta zona se ubican las grúas pórtico que se encargan de la carga y descarga de contenedores en los buques.
- Zona de almacenaje: Son grandes extensiones donde se almacenan los contenedores. Según la distribución de los mismos se distinguen dos tipos*:
 - Estructura europea o automatizada: Los bloques de contenedores están perpendiculares a la línea de atraque. Están automatizadas, ya que están pensadas para minimizar el espacio necesario entre los bloques de contenedores, de forma que no hay espacio para carretillas, por lo que solo se puede

acceder a los contenedores desde los extremos.

- Estructura asiática: Los bloques de contenedores se almacenan en paralelo a la línea de atraque. No están automatizados, sino que son grúas conducidas por operarios las que se encargan de los movimientos de los contenedores.

Aunque la tendencia es la automatización, hoy en día la mayoría de los grandes puertos del mundo siguen teniendo la zona de almacenaje según la estructura asiática, o combinando ambos modelos.

- Zona de operación terrestre: Es la zona donde se produce la carga y descarga de contenedores en los vehículos terrestres (camiones y trenes).
- Zona de servicio: Su estructura y organización depende de cada puerto. Comprende zonas de administración, oficinas, aduanas, etc.

Nota*: Hoy en día, la mayoría de las terminales de contenedores en Europa siguen teniendo una estructura asiática. La denominación de estructura europea a las terminales automatizadas se debe a que ha sido en Europa donde se han puesto en marcha las primeras terminales de este tipo.

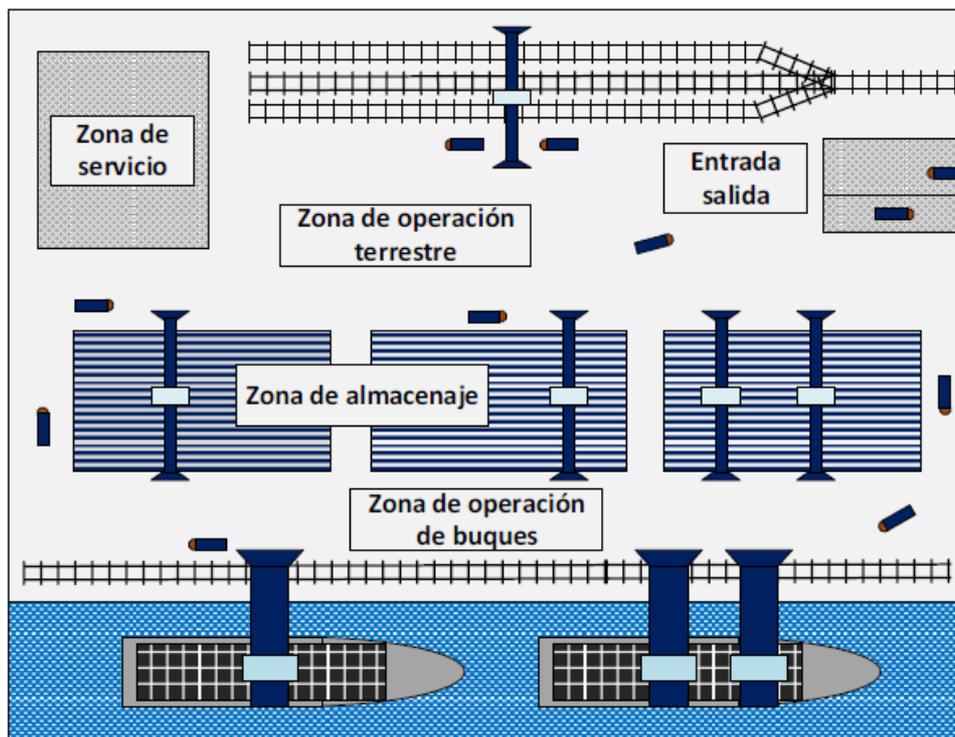


Figura 7. Zonas de una terminal portuaria

Fuente: (Arango 2014)

2.2.3 Equipos de una terminal portuaria de contenedores

Las terminales portuarias de contenedores tienen como fin primario el intercambio de la mercancía entre diferentes modos de transporte. La tendencia en las terminales es la automatización de procesos, como las propuestas expuestas en (Liu, Jula, y Ioannou 2002), (Hoshino y Ota 2007) y (Zhu et al. 2010), donde se detallan modelos de automatización de terminales portuarias.

Entre los recursos necesarios para desarrollar las diferentes operaciones en una terminal portuaria de

contenedores los más importantes son las grúas, encargadas de realizar los movimientos de los contenedores por la terminal. En función de la operación que deben cubrir, existen diferentes tipos de grúas en cuanto a tamaño, movilidad de las mismas, autonomía, etc. Asimismo, existen otros equipos necesarios para un correcto funcionamiento de una terminal portuaria de contenedores:

2.2.3.1 Grúas portico

Son grandes grúas encargadas de la carga y descarga de los buques portacontenedores. Se encuentran en una posición fija en la terminal, en la zona de operaciones de buques. Generalmente, se emplean varias grúas a la vez para la carga y descarga de un buque, para disminuir los tiempos de operación sobre los buques. El tamaño y la capacidad de trabajo de las grúas pórtico ha aumentado conforme lo hacían los buques, existiendo hoy en día grúas con alcance de más de 70 metros.



Figura 8 Grúa pórtico

2.2.3.2 Grúas polivalentes

Las grúas polivalentes son aptas para manipular cualquier tipo de mercancía, incluidos contenedores. La creciente contenedorización hacen que este tipo de grúas estén pasando a un segundo plano y siendo sustituidas por grúas pórtico y otras más especializadas en el manejo de contenedores, aunque siguen siendo habituales en algunos puertos debido a que su sustitución requiere una alta inversión.



Figura 9. Grúas polivalentes en el puerto de Bilbao

2.2.3.3 Grúas pórtico de almacenamiento

Este tipo de grúas tienen la misma estructura que las grúa pórtico de carga y descarga de buques, pero son de menor tamaño. Se emplean para colocar los contenedores que se encuentran apilados en el patio de contenedores en los diferentes medios de transporte terrestres, camiones o trenes. Se suelen colocar sobre plataformas con ruedas o raíles, lo que hace que sean móviles.



Figura 10. Grúa pórtico de almacenamiento

2.2.3.4 Carretilla pórtico

Son carretillas móviles, que se desplazan por toda la terminal para transportar los contenedores por la misma. Se encarga de los desplazamientos que conectan el patio de almacenamiento de contenedores con la zona de operaciones de buques y con la zona de operación terrestre.



Figura 11. Carretilla pórtico

2.2.3.5 Equipos de manipulación frontal

Son equipos móviles capaces de elevar contenedores de desplazarse, si bien son menos versátiles que las

carretillas pórtico.

Se diferencian dos tipos de equipos de manipulación frontal:

- El cargador frontal: Gracias a su brazo extensible, son capaces de elevar un contenedor desde cierta distancia.



Figura 12. Cargador frontal

- La grúa apiladora: Capaz de elevar contenedores a gran altura.



Figura 13. Grúa apiladora

2.2.3.6 Camiones con plataforma

Los camiones se emplean en las terminales para transportar los contenedores cuando las distancias son grandes, ya que son más rápidos que las carretillas pórtico y los equipos de manipulación frontal. Estos camiones cuentan con una plataforma sobre la que se colocan los contenedores, de forma que las operaciones sean lo más rápidas y cómodas posible, ya que est n pensando para trayectos cortos dentro de la terminal.



Figura 14. Camión con plataforma

En ocasiones, una sola cabeza tractora puede cargar con varias plataformas y transportar varios contenedores en un solo viaje, lo que permite aumentar la capacidad de carga y obtener transportes más eficientes.



Figura 15. Camión multi-plataforma

2.2.3.7 Vehículos autoguiados

Los vehículos autoguiados (*Automatic Guided Vehicles*, en adelante AGVs) se están abriendo hueco en las terminales de contenedores. Su función es la de transportar los contenedores por la terminal. Los AGVs se desplazan sin conductor, están robotizados de forma autónoma con el entorno, evitando además la colisión con otros elementos de la terminal.



Figura 16. Vehículo autoguiado

2.3 Servicios ofrecidos por una terminal portuaria de contenedores

Para que una terminal de contenedor cumpla sus funciones como intercambiador intermodal debe ofrecer diferentes servicios que en su conjunto sean capaces de cubrir todas las operaciones necesarias para que se produzca el cambio de modo de transporte. A continuación se presentan brevemente los principales servicios que se dan en una terminal portuaria de contenedores.

2.3.1 Carga y descarga de buques

Este servicio se ofrece a las líneas de transporte marítimo. Cuando un buque cargado con contenedores llega a una terminal, deben descargarse la mercancía que vaya a cambiar de modo de transporte. Para ello las TPC disponen de grúas y maquinaria de manipulación de contenedores que deben ser programadas para agilizar las operaciones de carga y descarga. Estas tareas deben ser optimizadas para reducir el tiempo que pasan los buques en las terminales y minimizar así el coste asociado a dichos tiempos.

2.3.2 Almacenamiento de mercancía

El almacenamiento temporal de contenedores es un servicio que se ofrece a los propietarios de la mercancía en los procesos de transporte. Consiste en disponer de un espacio en el que los contenedores pueden permanecer durante el tiempo que requieran mientras llega el medio (barco, tren o camión) en el que deben ser cargados. Para ofrecer este servicio las terminales disponen de maquinaria como la presentada en el apartado 2.2.3, capaces de transportar y elevar contenedores hasta colocarlos en pilas.

2.3.3 Cambio del modo de transporte

Destinado tanto a las líneas de transporte como a los propietarios de la mercancía, las TPC ofrecen los medios necesarios para llevar a cabo el cambio del modo de transporte. Además, esto se complementa con la posibilidad de trasladar la carga con diferentes puntos del hinterland de la terminal, posibilidad de transbordo a barcazas con destino a otras terminales más pequeñas, etc.

3 OPERATIVAS EN UNA TERMINAL DE CONTENEDORES PORTUARIA

Las terminales portuarias de contenedores son grandes superficies donde coexisten elementos muy diferenciados con fines particulares distintos, si bien todas las acciones que se producen en una terminal intermodal tienen un mismo objetivo: cambiar el modo de transporte en que se envía la mercancía.

Los contenedores llegan a la terminal por carretera, en ferrocarril, o en buques. Una vez en la terminal, se inicia el proceso de intercambio de modo, que consta de diferentes operaciones:

- 1) Descarga de la mercancía del buque.
- 2) Traslado del contenedor desde la zona de operaciones de buques hasta el patio de almacenamiento de contenedores.
- 3) Envío de la mercancía hasta la zona de operaciones terrestres.
- 4) Carga del contenedor en el ferrocarril o camión correspondiente.

Cuando el proceso sigue este orden se denomina envío de importación. Cuando la mercancía llega a la terminal por carretera o ferrocarril y sale de ésta por la vía marítima se denomina de exportación.

Debido a la variedad de operaciones a las que se somete un contenedor en la terminal, la prioridad por minimizar recursos, y la necesidad de que el cambio de modo se haga en el menor tiempo posible, surgen diferentes problemas que deben tratarse para conseguir la mayor eficiencia.

La variedad de las operaciones que se producen en una terminal portuaria hace que en la literatura se diferenciara distintas operativas que se desarrollan de manera simultánea. En trabajos como (Voß et al. 2004), (Stahlbock y Voß 2008) o (I. F. a Vis y De Koster 2003) se hacen revisiones bibliográficas donde se recogen las principales operaciones que se dan en las terminales de contenedores, y los problemas derivados de las mismas.

Las distintas operaciones de una terminal se dividen generalmente en función del entorno en que se desarrollan, correspondientes a las diferentes zonas de las terminales descritas en el apartado anterior. Considerando que las tareas que se desarrollan en la zona de servicio tienen una naturaleza diferente, se van a

analizar las operativas que se producen en las otras tres zonas.

Dichas operativas, y sus principales operaciones, se reflejan en la Figura 17.



Figura 17. Operaciones en una terminal portuaria de contenedores
Fuente: (Arango, Cortes, y Sanz 2010)

3.1 Operativa del buque

En la zona de operaciones de buques se dan diferentes tareas que deben desenvolvar en la carga o descarga de los contenedores de los barcos. Para ello deben resolverse tres problemas principales, los que responden a las preguntas:

1. ¿Qué muelle se asigna a cada buque?
2. ¿Cómo deben colocarse los contenedores en el buque?
3. ¿Cómo deben gestionarse las grúas pórtico para que la carga/descarga sea eficiente y segura?

Estas tres cuestiones dan lugar a sendos problemas, los cuales han sido muy estudiados durante años, y siguen siendo hoy día objeto de investigaciones.

3.1.1 El problema de asignación de muelles

Como se aprecia en la literatura, el problema de asignación de muelles es uno de los más estudiados. Llamado en inglés *berth allocation problem* (BAP), la resolución de este problema debe considerar varios aspectos:

- La ubicación de los contenedores que deben cargarse en el buque, con el fin de que estos se coloquen anteriormente en la zona de almacenamiento cerca del muelle donde atracará el buque.
- Los tiempos que pasan los buques en los muelles, así como las horas previstas de llegadas de los barcos.

En (Lai y Shih 1992) y en (Bierwirth y Meisel 2010) se llevan a cabo sendas revisiones de la literatura con el fin de facilitar el modelado de las características y sugerir algoritmos aplicables al BAP. Este segundo trabajo presta especial atención a los enfoques de soluciones integradas, los cuales son cada vez más relevantes en las terminales.

Se diferencian dos variantes del problema de asignación de muelles: problema estático y problema dinámico. El problema estático (SBAP) trata de cubrir una planificación siendo conocidas las entradas y salidas durante el proceso. La novedad del escenario dinámico (DBAP) es que se replanifica cada vez que se produce un nuevo evento en el sistema, como puede ser la llegada o salida de un tren o buque. Una resolución del SBAP se encuentra en (Dai et al. 2008), donde se trata de optimizar el proceso empleando un algoritmo genético. Otros estudios como el presentado en (Imai, Nishimura, y Papadimitriou 2001) tratan de resolver el problema de asignación de muelle considerándolo dinámico. Para resolver el problema no polinomial, desarrollan una heurística basada en una simplificación lagrangiana del problema original.

Para resolver el problema se han aplicado diferentes heurísticas. En (Nishimura, Imai, y Papadimitriou 2001) presentan una heurística basada en un algoritmo genético para resolver el problema. Este estudio se complementa con (Imai, Nishimura, y Papadimitriou 2003), donde se distinguen prioridades entre los distintos buques.

Uno de los factores que influyen en la tipología del problema es cómo se consideran los muelles, discreto o continuo, considerando discreto el muelle que tiene un número determinado de posiciones de atraque de buques, mientras que en un muelle continuo el número de buques que pueden atracar simultáneamente depende principalmente del tamaño de los propios buques. Esta característica se representa de manera visual en la Figura 18.

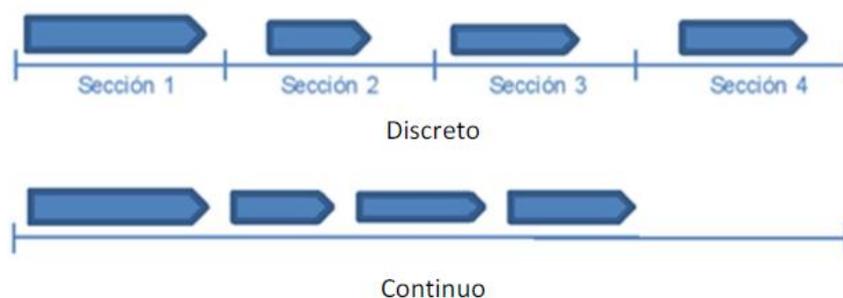


Figura 18. Muelle discreto vs muelles continuo

En (Imai et al. 2005) se desarrolla una heurística para resolver el BAP considerando un muelle continuo. En la misma línea, (S.-W. Lin y Ting 2013) propone una heurística basada en el algoritmo de recocido simulado,

concluyendo que dicha heurística alcanza el óptimo en problemas de pequeño tamaño, y encuentra buenas soluciones en problemas de gran tamaño debido a la propiedad convergente de dicho algoritmo. Otra investigación basada en el algoritmo de recocido simulado se encuentra en (Moorthy y Teo 2007).

Además, en la literatura se encuentran varias investigaciones que combinan la optimización y la simulación, como (Arango et al. 2013) que desarrolla un algoritmo genético para resolver el problema de asignación de muelles dinámico y se complementa con un modelo de simulación para dar consistencia a los resultados.

3.1.2 La planificación de la estiba dentro del buque

El plan maestro de muelle, conocido en la literatura científica como *stowage planning problem* o *master bay planning problem* (SPP, MBPP), consiste en la colocación de los contenedores dentro del buque. Debido a que los contenedores se colocan en pilas en los buques, es común que para que un contenedor determinado pueda ser descargado en un puerto se requiera la descarga de otro contenedor para tener acceso al contenedor a descargar, teniendo que volver a cargar posteriormente el contenedor cuyo destino es otro puerto. Estos movimientos deben evitarse para conseguir una mayor eficiencia, para lo que se lleva a cabo una planificación de la estiba. Un ejemplo de la colocación de los contenedores en un buque se observa en la Figura 19.

Los principales objetivos de una correcta estiba son:

- Garantizar la seguridad de la tripulación y el personal del puerto.
- Aprovechar al máximo la capacidad de carga de los buques.
- Proteger la mercancía de posibles daños.
- Colocar los contenedores de forma que se agilicen las operaciones de carga y descarga en los puertos.

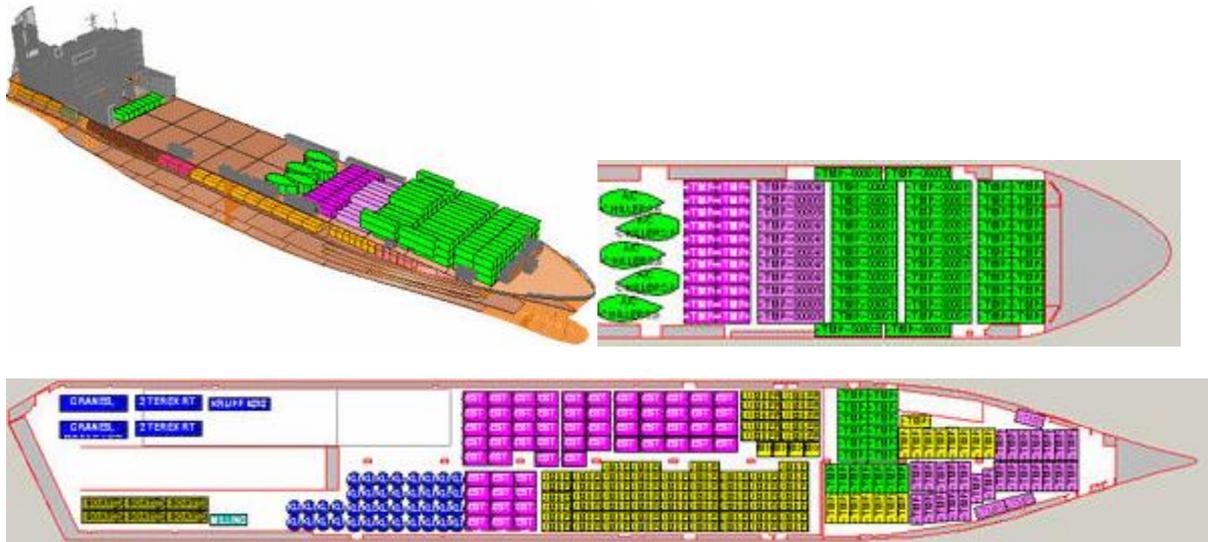


Figura 19. Visualización de estiba de un buque

Esta tarea ha correspondido históricamente a la naviera encargada del transporte. Esta información se envía a la terminal portuaria, la cual debe preparar los contenedores en la zona de almacenamiento para agilizar la posterior carga del buque. Sin embargo, la terminal elaboraba otra planificación de la estiba de manera independiente, lo que da lugar a problemas de recolocación de contenedores. Esta tesitura inspiró una investigación multiobjetivo que busca maximizar la estabilidad del buque y minimizar los movimientos de recolocación de contenedores (Imai et al. 2006).

El objetivo de la planificación de la estiba es maximizar la capacidad de los buques de carga, además de minimizar el tiempo necesario de atraque de los mismos en las terminales portuarias. Tal y como se analiza en (Tierney, Pacino, y Jensen 2014) se trata de un problema NP-complejo, aunque dicha investigación propone una estrategia para que el problema pase a dificultad polinómica.

En (Bortfeldt y Gehring 2001) se presenta un algoritmo genético para resolver el SPP, considerando diferentes tipos de contenedores que deben ser apilados en un mismo buque. Este trabajo avala el buen comportamiento del algoritmo genético en este problema frente a otros métodos de resolución.

En (Ambrosino et al. 2009) se resuelve el problema de la estiba partiendo de la solución óptima de subconjuntos independientes. Para resolver el problema general se utiliza una heurística basada en una búsqueda tabú. El algoritmo permite, además de garantizar la estabilidad del buque, reducir el tiempo de manipulación de los contenedores al ser cargados. Posteriormente, en (Ambrosino y Anghinolfi 2010) se presentan dos nuevas heurísticas para resolver el MBPP. Por un lado, se muestra una heurística simple constructiva, además de un algoritmo de optimización basado en colonia de hormigas. El comportamiento de estos procedimientos se compara con el que aporta la búsqueda tabú, presentada anteriormente.

En (Wilson, Roach, y Ware 2001) los autores introducen la idea de dividir el problema complejo de la estiba en subproblemas: un proceso de planificación estratégico general, y un procedimiento de planificación

táctica especializada, donde los contenedores concretos quedan asignados a posiciones determinadas.

En (Avriel y Penn 1993) se trata la planificación de la estiba con el fin de minimizar el número de movimientos de contenedores sin tener en cuenta las limitaciones de estabilidad. Primeramente se realiza un modelo de programación lineal binaria para el problema simplificado. Sin embargo, este tipo de modelo está muy limitado cuando el tamaño del problema aumenta debido al elevado número de variables necesarias para la resolución. Por esta razón, se presenta un algoritmo heurístico basado en una matriz de transporte "reducido", es decir, contenedores con los mismos puertos de origen y de destino se guardan en pilas completos siempre que sea posible, y sólo los contenedores restantes se asignan por el modelo de programación lineal binaria. Este enfoque a menudo permite la planificación de estiba de un número mucho mayor de recipientes que el uso de la formulación exacta. En la misma línea, (Avriel et al. 1998) y (Ambrosino, Sciomachen, y Tanfani 2004) parten del modelo lineal binario y lo complementan con una heurística que permite relajar algunas restricciones, y abarcar así problemas de mayor tamaño.

3.1.3 Problema de programación de grúas pórtico

Conocido en la literatura como *quay crane scheduling problem* (QCSP), el problema de programación de grúas de buques consiste en determinar la secuencia de movimientos de carga y descarga de las grúas asignadas a un buque con el fin de minimizar el tiempo que debe permanecer el buque en el puerto. (Daganzo 1989) presenta el problema como complejo NP, y limita la resolución por métodos numéricos exactos a casos con pocos buques.

Para resolverlo, muchos autores han propuesto diferentes métodos, como se recoge en (Meisel y Bierwirth 2011) donde se muestra un enfoque unificado para evaluar el desempeño de diferentes modelos y algoritmos propuestos en la literatura para la resolución del QCSP.

En (Moccia et al. 2006) se presenta el problema de programación de muelles como un problema de rutado (*vehicle routing problem*, en adelante VRP) con restricciones de precedencia. El trabajo incluye el desarrollo de un algoritmo de ramificación y corte (*branch and cut*) para problemas grandes, mientras que los de menor tamaño se resuelven empleando el software comercial de optimización CPLEX.

En la misma línea en (Peterkofsky y Daganzo 1990) desarrollan un método de ramificación y poda (*branch and bound*) para obtener la solución óptima del QCSP. Un algoritmo similar se emplea en (Kim y Park 2004) donde además, se propone una heurística basada en un algoritmo GRASP (*greedy randomized adaptative search procedure*) de menor carga computacional, y se comparan los resultados alcanzados por ambos procedimientos. Una comparación con este trabajo se presenta en (Sammarra et al. 2007), donde se propone una heurística de búsqueda tabú para el problema de programación de grúas. El QCSP se descompone en un problema de enrutamiento y otro de programación, siendo el primero resuelto con el algoritmo tabú y resolviendo el problema de programación con una técnica de búsqueda local. Por su parte, en (Bierwirth y Meisel 2009) los autores presentan un modelo de optimización para el problema de programación de grúas de muelle y se propone una heurística para resolverlo. Básicamente, se aplica un

algoritmo *branch and bound* para alcanzar un subconjunto de buenas soluciones, utilizando un criterio de ramificación y poda centrado en las restricciones de interferencia de grúas.

En (Bish 2003) se resuelve un problema de programación de varias grúas con restricciones, dividiendo el mismo en tres subproblemas: determinar la ubicación del contenedor una vez descargado, definir la asignación de vehículos a los contenedores que deben ser transportados en la terminal, y programar las operaciones de carga y descarga de las grúas. Se desarrolla para ello un algoritmo heurístico basado en la formulación del problema como un problema de transbordo.

Una variante del problema consiste en considerar conjuntos el problema de asignación de muelle BAP y el de programación de grúas pórtico QCSP. En (Liang, Huang, y Yang 2009) se presenta el problema QCSP conjunto con el de asignación de muelle (BAP), por lo que se introduce una formulación simultánea de ambos problemas. Dicho problema se resuelve empleando un método que combina un algoritmo genético con una heurística rápida que permite obtener soluciones aproximadas del problema. En la misma línea, (Tavakkoli-Moghaddam et al. 2009), (D.-H. Lee, Wang, y Miao 2008) y (Imai et al. 2008) proponen un modelo de programación entera mixta para el problema de programación y asignación de grúas de muelle. Estas investigaciones resuelven el problema con una heurística basada en un algoritmo genético, y se demuestra su idoneidad comparando los resultados en términos de carga computacional con los ofrecidos por el software comercial LINGO.

3.2 Operativa de almacenamiento y apilado

La gestión de las zonas de almacenamiento de las terminales ha adquirido mucha importancia a medida que ha aumentado el tráfico de contenedores, debido a la necesidad de almacenar un número mayor de contenedores en un determinado espacio, a menudo limitado y sin posibilidad de crecer. Por ello, el uso eficiente de los recursos requeridos para el almacenaje es fundamental para conseguir eficiencia en toda la cadena logística. Entre estos recursos se encuentran las grúas, los vehículos encargados de transportar los contenedores en la terminal y el espacio disponible para el almacenamiento.

La operativa de almacenamiento y apilado engloba dos subsistemas, los cuales se detallan a continuación.

3.2.1 La localización de los contenedores en la zona de almacenaje

Conocido en la literatura como *yard allocation problem* (YAP), este problema consiste en asignar una posición a cada contenedor que llega a la zona de almacenaje. En este problema hay que tener en cuenta factores como el tamaño del contenedor a almacenar, la fecha y hora a la que debe ser cargado el contenedor en el tren o barco, las características del contenedor, etc. El objetivo principal de una buena planificación de la ubicación de los contenedores es minimizar el tiempo que deben pasar los contenedores en la zona de almacenamiento, así como agilizar el proceso de almacenar los contenedores.

En (Gambardella, Rizzoli, y Zaffalon 1998) se presenta un sistema de ayuda a la toma de decisiones para la gestión de una terminal. Entre los problemas a resolver considera el YAP, así como la asignación de recursos y la programación de operaciones, con el fin de maximizar la eficiencia de la terminal. Este sistema se basa en la programación lineal entera, y en la simulación de eventos discretos que se emplea para validar los resultados.

En (Zhang et al. 2003) se estudia el problema de asignación de espacio de almacenamiento en los patios de contenedores. Los autores plantean una división del problema en dos subproblemas de diferente nivel, formulando cada uno de ellos como modelos de programación matemática:

- En el primer nivel, se determina el número total de contenedores que se ubica en cada bloque de almacenamiento en cada período de tiempo del horizonte de planificación
- El segundo nivel determina el número de contenedores asociados con cada buque con el fin de minimizar la distancia total del transporte de los contenedores entre sus bloques de almacenamiento y los lugares de atraque de los buques.

En (Bazzazi, Safaei, y Javadian 2009) se presenta un algoritmo genético para resolver el problema de localización de contenedores en una terminal. La validez del algoritmo se refleja con los resultados ofrecidos por el mismo al resolver diferentes modelos. En la misma línea, (Kim y Park 2003) formulan un modelo de programación lineal entera mixta para resolver el problema de exportación. Se proponen para resolver el problema dos algoritmos heurísticos basados en el tiempo de permanencia de los contenedores y en un método subgradiente de optimización respectivamente.

En (Canonaco et al. 2008) se plantea un modelo de red de colas. Se emplea además un software de simulación de eventos discretos implementado en Delphi para comprobar la validez de los resultados obtenidos.

En (L. H. Lee et al. 2006) se propone una metodología de pre-localización de los espacios en la zona de almacenamiento para los contenedores con el fin de maximizar la eficiencia en las operaciones de carga de contenedores. Se formula un modelo de programación entera mixta para determinar el número mínimo de grúas de patio necesarias y la ubicación donde se deben almacenar contenedores sin carga. El modelo se resuelve usando CPLEX. Los autores consideran la posición de los contenedores en los diferentes bloques dentro de la zona de almacenamiento, no teniendo en cuenta las diferentes ubicaciones posibles del contenedor dentro de un mismo bloque.

Otras investigaciones consideran conjunto el problema con el de la gestión de grúas del muelle, al ser dependientes el uno del otro. Así, (Chen et al. 2007) presentan un modelo integrado para programar los equipos necesarios para los procesos de carga de contenedores en una terminal, incluyendo la gestión de grúas pórtico de muelles, grúas de la zona de almacenamiento, y vehículos de la zona de almacenamiento. Se propone un algoritmo de búsqueda tabú para resolver el problema.

En (Zhen, Chew, y Lee 2011) se contempla el problema integrado de la gestión de muelles y la gestión de la zona de almacenamiento, asignando ubicaciones del patio de contenedores a los buques, ya que son dos

problemas que dependen el uno del otro. Se propone un modelo un modelo de programación entera mixta para integrar ambos problemas con el fin de minimizar los costes asociados a los procesos, teniendo en cuenta la distancia entre el muelle y la zona de almacenamiento designadas a cada buque. Para resolver el problema a gran escala se desarrolla un algoritmo heurístico, el cual es validado a partir de ejemplos numéricos. Por su parte, (Gambardella et al. 2001) muestran una metodología para la resolución del problema integrado, y demuestran la validez de la misma con un software de simulación.

3.2.2 La relocalización de contenedores en la zona de almacenaje

Conocido en la literatura como *container pre-marshalling problem* (CPMP), el problema de relocalización surge debido a la necesidad de reordenar los contenedores en la zona de almacenamiento con el fin de conseguir la máxima eficiencia en los procesos de carga. Estos movimientos son necesarios para situar los contenedores en una ubicación cercana a la zona en la que van a ser cargados, ya sea en buques u otros modos de transporte, y minimizar los tiempos que deben de pasar los buques, trenes y camiones en la terminal. Este proceso se realiza una vez finalizado el plan de estiba del buque y antes de comenzar el proceso de carga (Caserta y Voß 2009). En la Figura 20 se pueden observar una representación del problema de recolocación de contenedores.

En (Caserta, Schwarze, y Voß 2012) se presenta el problema como no polinomial complejo. Para resolverlo, se presenta un modelo matemático que proporciona soluciones óptimas. Sin embargo, debido al comportamiento no polinomial del problema, este método solo es válido para problemas de un tamaño limitado. Para resolver problemas de mayor tamaño, se propone un modelo de programación lineal binaria considerando algunas simplificaciones comunes en la literatura. Por otro lado, se propone una heurística simple basada en reglas de reubicación para generar soluciones de calidad en tiempos computacionales muy cortos, con el fin de resolver el problema en tiempo real. La validez de la heurística se comprueba comparando los resultados con los ofrecidos por un optimizador comercial.

En (Jovanovic, Tuba, y Voß 2015) se desarrolla un algoritmo basado en la combinación de varias heurísticas y se demuestra la validez del mismo. En lugar de aleatorizar para mejorar el rendimiento del algoritmo que requiere la generación de nuevas soluciones, las diferentes heurísticas se emplean generando pocas soluciones nuevas de calidad y descartando la generación aleatoria. Esto produce una mejora tanto en la calidad de las soluciones encontradas, como en la carga computacional requerida. Por su parte, (Forster y Bortfeldt 2012) presentan una heurística basada en un procedimiento de búsqueda de árbol para resolver el CPMP, y demuestran la validez y la adecuación de la misma para este problema.

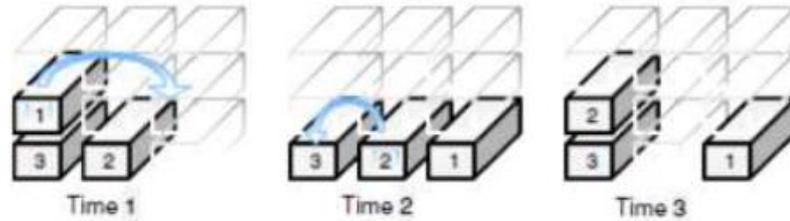


Figura 20 Representación del CPMP

Fuente: (Forster y Bortfeldt 2012)

(Y. Lee y Chao 2009) se centran en que los únicos contenedores accesibles en un patio de contenedores son los que se encuentran en la parte superior de cada bloque, lo que genera la necesidad de manipular contenedores que no van a ser cargados. En este trabajo se propone una heurística que consiste en dos subrutinas principales y tres subrutinas menores. Cada uno de los componentes juega un papel diferente en la heurística. En la primera, se establece la trayectoria que deben seguir los contenedores que deben ser cargados próximamente para estar situados sobre aquellos con fecha de carga más tardía. En la segunda, mediante programación lineal entera, se elige la trayectoria que requiere menos movimientos.

En (Y. Lee y Hsu 2007) se plantea un modelo matemático para el CPMP. Partiendo de un layout de la zona de almacenamiento y de una determinada secuencia de carga de contenedores, el modelo genera un plan para recolocar los contenedores en el patio. Consiste en un modelo de programación entera compuesta por un problema de flujo de múltiples productos y un conjunto de consideraciones:

- La pre-agrupación se realiza en el mismo bloque de contenedores.
- En cada bloque solo se agrupan contenedores de un tamaño concreto.
- Solo es atendido un barco por grúa y por bloque de contenedores.
- La programación de la carga de contenedores es conocida.

En (Expósito-Izquierdo, Melián-Batista, y Moreno-Vega 2012) el objetivo del problema es reducir al mínimo el número de movimientos necesarios para organizar todos los contenedores de modo que las reubicaciones adicionales no sean necesarios. Se presenta un método heurístico para resolver el CPMP y se compara con otros métodos propuestos en la literatura. Se elabora un generador de casos capaz de crear problemas de diferentes niveles de dificultad, desde dificultad baja hasta complejos. Para determinar la complejidad se toman en cuenta tanto la tasa de ocupación del patio de contenedores como el porcentaje de contenedores con alta prioridad –que deben ser accesibles– que se encuentran situados bajo contenedores de menor prioridad. Los experimentos computacionales corroboran el buen desempeño tanto de la heurística como del generador de escenarios.

3.3 Operativa de transferencia

En las terminales portuarias de contenedores se producen movimientos de contenedores a nivel interno, es decir, además de las llegadas y salidas de buques, trenes y camiones de contenedores. Este transporte se divide generalmente en dos tipos:

- El transporte horizontal, que consiste en los desplazamientos de los contenedores desde un punto de la terminal a otro. Este transporte se divide en transporte en muelle y transporte terrestre, dependiendo de que zona de la terminal conecte con la zona de almacenamiento.
- El transporte vertical, en referencia al apilado de contenedores en la zona de almacenamiento, expuesto en el apartado 3.2.

A continuación se presenta una revisión bibliográfica sobre los tres problemas que constituyen la operativa de transferencia en las terminales portuarias.

3.3.1 El transporte en muelles

Este problema consiste en transportar los contenedores desde la zona de almacenamiento hasta la zona de operación de los buques, y viceversa. En la literatura es comúnmente denominado *quayside transport problem* (QTP). Los principales objetivos de la gestión del transporte en muelle son agilizar las tareas de carga y descarga de los buques, evitar tiempos de espera y maximizar la eficiencia y la seguridad de toda la terminal.

Históricamente, los desplazamientos de contenedores entre las grúas de los buques y la zona de almacenamiento se han llevado a cabo en carretillas móviles conducidas por operarios. En (Kim y Kim 1999) se resuelve el problema de transporte formulándolo como un problema de programación entera mixta, donde la función objetivo consiste en minimizar los tiempos totales de transferencia en la terminal. Sin embargo, la tendencia actual en las terminales portuarias es realizar estas tareas utilizando vehículos autoguiados, cuya eficiencia es analizada en trabajos como (I. F. a. Vis 2006). Una representación del movimiento de los AGVs en una terminal se refleja en la Figura 21, donde se muestra una terminal organizada según una estructura europea.

En (I. F. A. Vis et al. 2001), los autores elaboran un algoritmo de flujo mínimo con el fin de dimensionar una terminal portuaria en cuanto al número de AGVs necesarios.

Con el objetivo de minimizar la distancia total a recorrer, (Ho y Hsieh 2004) plantean el problema de programar vehículos AGVs. Para ello, se llevan a cabo simulaciones para analizar la relación entre la capacidad de trabajo de las grúas y de los AGVs. Además, se determinan los recorridos que deben seguir los AGV empleando para ello una metodología basada en un algoritmo *simulated annealing*.

En (He et al. 2015) se remarca la importancia de que las tareas de transporte llevadas a cabo por los camiones internos de la terminal estén en sincronía con las grúas de muelle y con las grúas del patio de contenedores.

Por ello se aborda el problema de programación integrado de gestión de grúas pórtico, grúas de la zona de almacenamiento y camiones. Dicho problema se formula como un modelo de programación entera mixta donde el objetivo es minimizar el retardo de salida total de todos los buques. El algoritmo de optimización empleado para resolver el problema integra un algoritmo genético y uno de optimización por enjambre de partículas, donde el algoritmo genético se encarga de una búsqueda global y el de optimización por enjambre de partículas de la búsqueda local.

En (Luo y Wu 2015) se propone un nuevo enfoque para determinar las reglas de secuenciación de AGVs, teniendo en cuenta de forma simultánea los procesos de carga y descarga. Este problema se formula como un modelo de programación entera mixta con el objetivo de minimizar el tiempo de permanencia de los buques en las terminales. El trabajo concluye que el modelo alcanza soluciones óptimas en problemas de tamaño pequeño, mientras que en problemas de mayor tamaño el tiempo computacional dificulta la resolución. Por ello se propone una heurística basada en un algoritmo genético para resolver problemas de mayor tamaño.

En (Kim y Bae 2004) se pretende minimizar los atrasos de los buques optimizando el transporte de los contenedores entre la zona de almacenamiento y las grúas de muelle. Estos desplazamientos los realizan los AGVs, por lo que el problema consiste en asignar las tareas de transporte a los diferentes AGVs. Para ello, primeramente se formula un modelo matemático para su resolución, y posteriormente se desarrolla un algoritmo heurístico para reducir los tiempos computacionales.

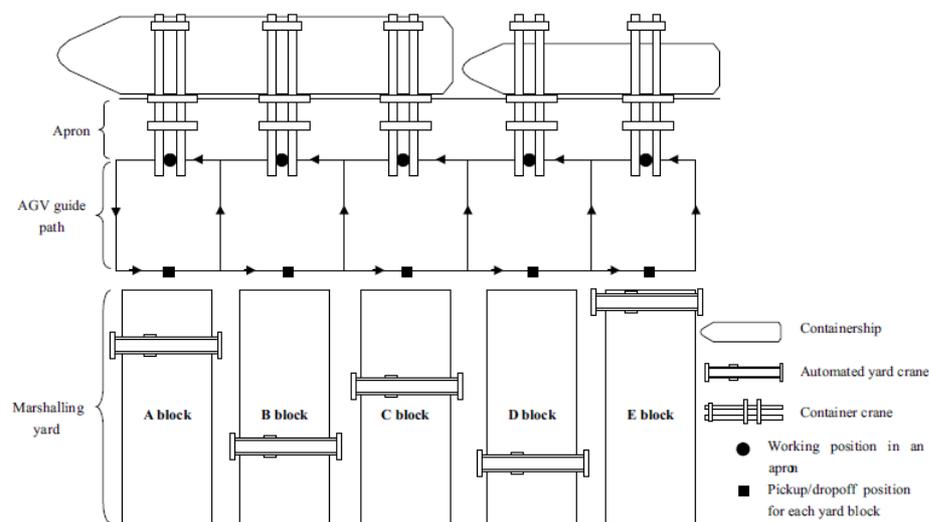


Figura 21 Movimientos de los AGVs en una terminal

Fuente: (Kim y Bae 2004)

3.3.2 El transporte terrestre

Se entiende por transporte terrestre en una terminal intermodal a todos los movimientos de contenedores necesarios que se desarrollan en la terminal. Estos desplazamientos deben producirse tanto para la entrada y salida de contenedores en la terminal, como para otras actividades como aduanas, desembalajes de la carga o reubicación de contenedores vacíos. Al conjunto de operativas de transporte terrestre en una terminal intermodal se le conoce en la literatura como *landside transport problem (LTP)*.

El problema clásico de transporte, conocido en la literatura como *vehicle routing problem (VRP)* es un problema muy estudiado en la literatura en sus múltiples versiones. Una variación del mismo es el *truck and trailer routing problem (TTRP)*, donde el objetivo es minimizar la distancia total recorrida para cubrir todas las tareas o bien minimizar el uso de recursos necesarios. En el TTRP, una flota de camiones debe servir a un conjunto de clientes. En este problema se consideran diferentes tipos de camiones, con diferente capacidad de carga, considerando camiones con tráiler o sin ellos. Algunas restricciones que presenta este problema son clientes con limitaciones de accesibilidad, donde determinados camiones no pueden servir a ciertos clientes, o clientes que requieren un camión al completo.

Autores como (Hansen 2004) han desarrollado diferentes investigaciones con el fin de resolver el problema por diferentes métodos.

En la Figura 22 se muestra una representación del TTRP, considerando diferentes tipos de camiones.

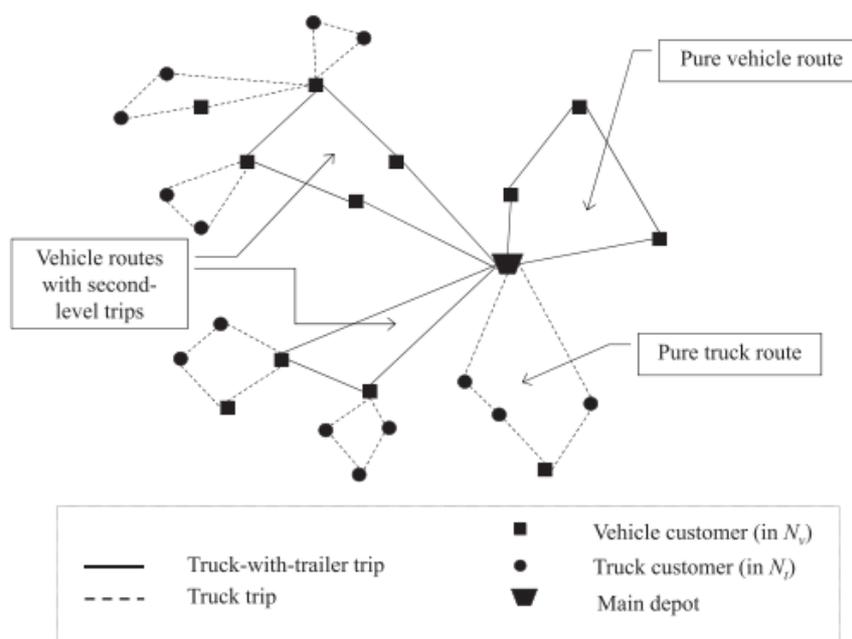


Figura 22 Representación de una solución del TTRP

Fuente: (Villegas et al. 2013)

En (Chao 2002) se plantea una resolución del problema a partir de un modelo de programación entera que

tiene por objetivo minimizar los costes asociados a la utilización de recursos. En la misma línea, (a. Caris y Janssens 2009) y (A. Caris y Janssens 2008) resuelven el problema planeando métodos heurísticos.

En (Scheuerer 2006) se desarrolla un algoritmo basado en una búsqueda tabú. Dicho algoritmo se utiliza para resolver el TTRP con el objeto de minimizar la distancia total recorrida. Por su parte, en (Nishimura, Imai, y Papadimitriou 2005) se presenta un modelo de programación entera con el mismo objetivo, y desarrolla un algoritmo genético para resolverlo.

Otros autores comparan diferentes heurísticas para resolver el problema. (S. W. Lin, Yu, y Chou 2009) emplean un algoritmo de recocido simulado para resolver el TTRP, y concluyen que dicha heurística es competitiva con respecto a la búsqueda tabú.

Una cuestión importante a la hora de planificar el transporte terrestre en una terminal es definir el número de vehículos necesarios. Estudios como (I. F. a. Vis, de Koster, y Savelsbergh 2005) pretenden determinar la flota mínima de vehículos necesaria para cubrir las tareas de transporte en la terminal añadiendo ventanas temporales.

Un concepto más amplio de la operativa de transporte terrestre es el problema del acarreo terrestre, nominado en la literatura *Daily Drayage Problem* (DDP). Este problema contempla la conexión entre la terminal intermodal y el *hinterland*, incluyendo las operaciones de carga y descarga de contenedores en los vehículos. El objetivo del DDP es optimizar las tareas de envíos de contenedores desde la terminal hasta los clientes y proveedores, y viceversa. La dependencia de las operaciones de acarreo en de las terminales intermodales fue analizada en (Braekers, Caris, y Janssens 2012).

En (Escudero et al. 2013) los autores muestran la necesidad de conocer en tiempo real datos de posicionamiento de los vehículos a partir de tecnología GPS. Además, presentan un método para la gestión dinámica del acarreo terrestre basado en un algoritmo genético. En la misma línea, en (Escudero et al. 2015) se presenta un método viral para resolver el problema.

3.3.3 La programación de las grúas

En las grandes terminales, la carga y descarga de los bloques de contenedores en la zona de almacenamiento se llevan a cabo mediante las grúas pórtico de almacenamiento expuestas en el capítulo 2. Estas grúas son lentas en los desplazamientos, por lo que estas operaciones suelen generar atrasos causantes de cuellos de botella en las terminales. Por tanto, la programación de las grúas de almacenamientos es crucial para resolver los problemas de eficiencia operativa, el consumo de energía y el coste de funcionamiento de un terminal de contenedores (Yan et al. 2011). Este problema se conoce en la literatura como *yard crane scheduling problem* (YCSP).

En (Ng y Mak 2005) el objetivo es minimizar la suma de los tiempo de trabajo de las grúas de la zona de almacenamiento. Para resolver el problema de programación de manera óptima se propone un algoritmo de ramificación y poda (*branch and bound*). Los resultados de la aplicación del algoritmo a diferentes ejemplos

muestran la adecuación del método propuesto al problema.

En (Chang et al. 2011) se establece un modelo de programación entera para optimizar las tareas de las grúas pórtico de almacenamiento. Debido a la complejidad del problema y de la consecuente carga computacional que requiere su resolución, se emplea un algoritmo genético para resolverlo. Además se complementa con un modelo de simulación para generar diferentes planes y evaluar el funcionamiento de la heurística. Otros autores como (Guo et al. 2011) desarrollan un algoritmo que emplea en primer lugar una búsqueda global y posteriormente una búsqueda local para acelerar el cálculo.

En (He et al. 2010) se pretende resolver el problema de programación de grúas en un entorno dinámico, donde se lleva a cabo una replanificación cada vez que se produce un evento (carga o descarga de un contenedor, llegada de un buque, etc.). Se elabora un modelo para programar las grúas asignadas a bloques de contenedores. Para ello se emplea un algoritmo híbrido basado en un algoritmo genético paralelo. Para validar los resultados se elabora también un modelo de simulación. Para la elaboración del modelo se parte de las premisas:

- Todas las grúas de patio poseen la misma capacidad de trabajo.
- Cada bloque de contenedores puede ser operado solo por dos grúas como máximo, para evitar colisiones entre grúas.
- Todas las grúas comienzan y terminan de operar en el mismo periodo de planificación.
- La carga de trabajo atrasado desde un período se añade al siguiente período.
- En un mismo periodo, cada grúa se puede mover dos veces de bloque a otro.
- La carga de trabajo de cada período se puede pronosticar.

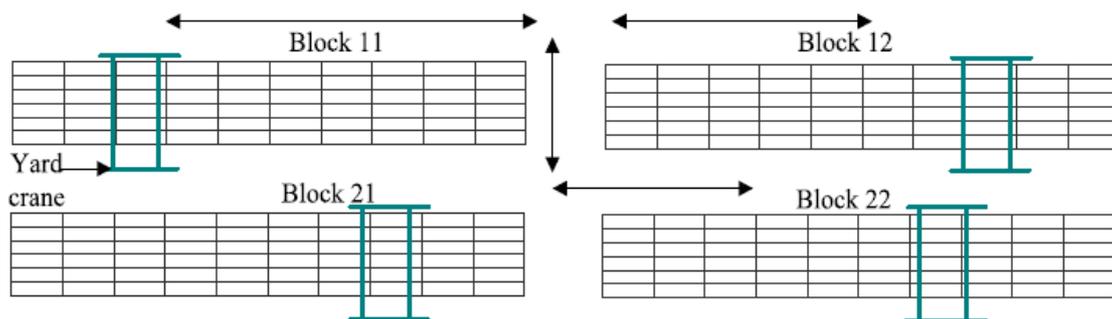


Figura 23. Movimientos posibles de grúas de almacenamiento

Fuente: (He et al. 2010)

En (Ng 2005) se examina el problema de la programación de varias grúas de patio para realizar un determinado conjunto de trabajos con diferentes tiempos de preparación en una zona de patio con un solo carril bidireccional. Debido al uso compartido del carril, se producen interferencias entre grúas que pueden

producir el bloqueo de alguna grúa. En el trabajo los autores desarrollan una heurística basada en programación dinámica para resolver el YCSP, y demuestra su validez con ejemplos numéricos. También se consideran interferencias en (Li et al. 2009).

En (Cheung, Li, y Lin 2002) se considera el problema de la programación de los movimientos de grúas en un patio de almacenamiento de contenedores para reducir al mínimo la carga de trabajo inacabado total al final de cada período de tiempo. El problema se formula como programación lineal entera mixta. Para resolverlo se describe un procedimiento de descomposición de Lagrange.

Debido a la incidencia que tiene el problema de programación de grúas con los distintos problemas de transporte que se dan en la zona de almacenamiento, algunos autores consideran un problema conjunto que engloba ambas operativas. Así, en (Cao et al. 2010) se propone un modelo que integra el problema del transporte terrestre presentado en el punto 3.3.2 y el de las grúas pórtico de las zonas de almacenamiento. El problema se formula como un modelo de programación lineal entera mixta. El método de resolución propuesto se basa en la descomposición de Benders, cuya adecuación queda demostrada a partir de ejemplos numéricos.

4 EL PROBLEMA DE SECUENCIACIÓN Y PROGRAMACIÓN DE GRÚAS

Una vez analizado el estado del arte sobre los diferentes problemas que aparecen en las terminales portuarias de contenedores, se puede considerar una terminal intermodal de contenedores como un sistema complejo compuesto a su vez por múltiples operativas diferentes, las cuales deben ser optimizadas si se pretende conseguir un funcionamiento eficiente de toda la cadena de transporte. Dichas operativas, lejos de ser independientes, mantienen una fuerte relación las unas con las otras, lo que sugiere que el enfoque más apropiado para afrontar el problema es considerar diferentes procesos de manera conjunta.

El creciente tráfico de mercancías en las terminales intermodales hace imprescindible planificar las operaciones con el fin de evitar cuellos de botella en los diferentes procesos, los cuales generan costes adicionales a la cadena logística. Estos costes se suelen asociar al uso ineficiente que se haga de los recursos requeridos en una terminal intermodal. Entre los recursos, los muelles de atraque son considerados los más costosos debido al alto coste asociado a la construcción de nuevos muelles, a veces incluso inviable debido a las limitaciones geográficas de la zona. Resulta por tanto fundamental gestionar de manera competente la ocupación de los muelles de atraque en las terminales.

Otro aspecto relevante en las terminales de contenedores es el tiempo que pasa la mercancía en la propia terminal. Considerando que la mercancía se transporta siguiendo un modelo intermodal, el proceso que siguen los contenedores en la terminal es:

1. Entrada en la terminal en buques.
2. Descarga del contenedor.
3. Permanece en la zona de almacenamiento.
4. Carga del contenedor en el tren o camión.
5. Salida de la terminal.

Este proceso, representado en la Figura 24, es conocido como importación. También se considera el proceso de exportación que se produce en sentido inverso, llevándose a cabo las entradas de contenedores por carretera o ferrocarril, los cuales son posteriormente cargados y salen de la terminal en buques.

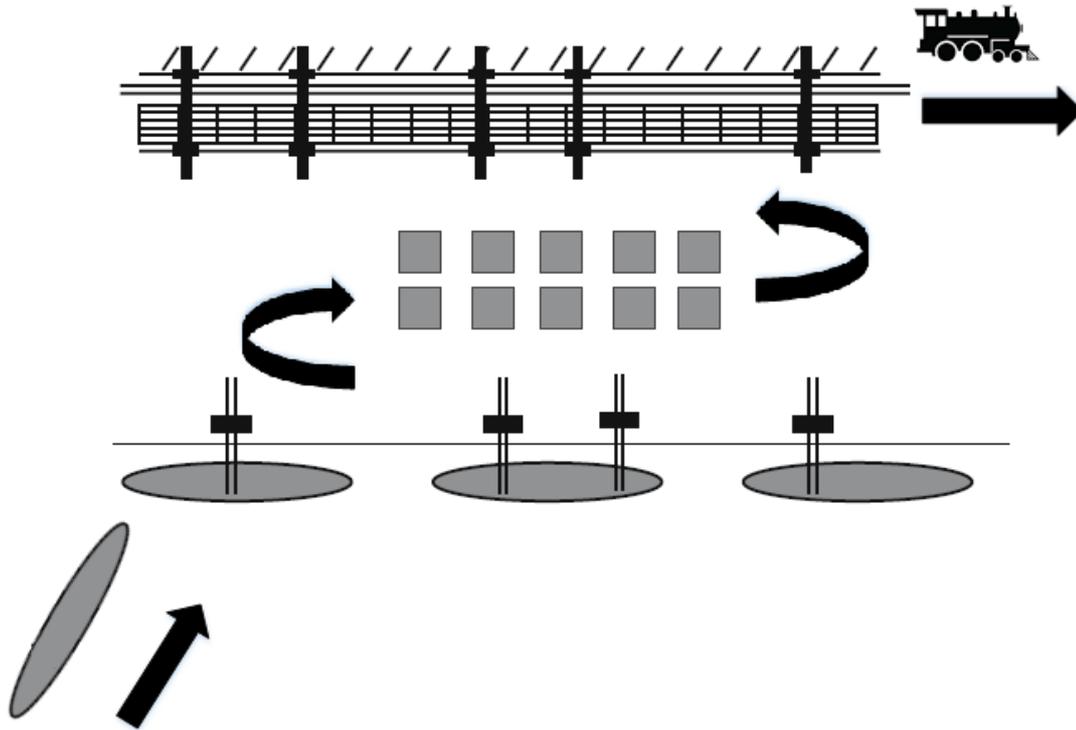


Figura 24. Representación de un proceso de importación de mercancías

El espacio con el que se cuenta en la zona de almacenamiento es también un recurso limitante en una terminal intermodal. Minimizar el tiempo que deben pasar los contenedores en la terminal supone que la necesidad de espacio en la zona de almacenamiento sea menor, lo que se traduce en un uso eficiente del recurso espacio. Esto puede conseguirse sincronizando la carga y descarga de los contenedores de los diferentes transportes, considerando para cada contenedor tanto el vehículo en el que entran a la terminal como en el que salen.

4.1 Definición del problema

El problema a resolver consiste en minimizar todo el tiempo de servicio de la terminal intermodal. Este tiempo de servicio incluye desde el instante en que llegan los buques y los trenes, hasta su salida de la terminal una vez concluidos los procesos de descarga y carga de contenedores. Para lograrlo se tendrán en cuenta cuatro operativas que deben ser resueltas:

1. Asignación de muelles. Se le deberá asignar a cada buque una hora de llegada al muelle, siempre y cuando haya disponibilidad.
2. Programación de las grúas de muelle. Se tomará la decisión de cuantas grúas operan sobre cada buque, y que acción realizan en cada instante.
3. Asignación de los instantes de llegada a los trenes.

4. Programación de las grúas de trenes. Dicha operativa es análoga a la programación de grúas de muelle.

4.2 Formulación conceptual del problema

La complejidad del problema en escenarios de tamaño considerable hace que no se lleve a cabo su resolución por métodos exactos, debido al alto coste computacional que supone. Se buscará encontrar una buena solución del problema a partir de un método heurístico basado en un algoritmo de recocido simulado, como se detalla en el apartado siguiente. No es necesaria por tanto la formulación del modelo matemático del problema, que se presenta a continuación desde un punto de vista conceptual.

4.2.1 Consideraciones y simplificaciones del problema

Existen una serie de consideraciones previas a tener en cuenta a la hora de afrontar este problema.

- Se considera el problema en una terminal intermodal, por lo que los contenedores que lleguen por vía marítima, serán descargados del buque y cargados en trenes, y viceversa; existiendo también la posibilidad de que un contenedor sea descargado de un buque y cargado en otro barco.
- Los contenedores asignados a cada tren y a cada buque son conocidos de antemano, tanto los que deben ser descargados como los que se cargan posteriormente.
- La secuencia de carga y descarga de los contenedores de los buques se considera predefinida ya que esta información se determina en el plan de estiba. Por su parte, la secuencia de carga y descarga de los trenes sí es variable y debe determinarse la secuencia óptima.
- Sólo podrán cargarse contenedores que previamente hayan sido descargados, ya que el planificador se encarga de organizar todo el intercambio intermodal, desde la llegada del contenedor hasta su salida de la terminal.
- El muelle se considera continuo, por lo que la disponibilidad de atraque será determinada por la disponibilidad de grúas pórtico.
- Varias grúas pueden actuar simultáneamente sobre un mismo buque o tren.
- El tiempo se considera en cuantos, siendo el instante 0 el momento de inicio de la planificación.

Debido a la complejidad del problema, se tienen en cuenta varias simplificaciones, todas ellas justificadas y que no modifican la validez de las soluciones alcanzadas.

- No se considera existencia de zona de apilamiento interno. Esta decisión se debe a que el planificador cubre todo el intercambio intermodal.

- El transporte terrestre se limita a transporte ferroviario. Los camiones pueden ser considerados trenes con capacidad de carga unitaria.
- No se consideran los tiempos de transporte de contenedores entre la zona de operaciones de buques y las zonas de operaciones terrestres, ya que se supone que dichos tiempos son constantes y no representativos.
- Los contenedores no se representan individualmente sino como conjuntos de contenedores. Esta simplificación se debe a que es habitual encontrar que un mismo bloque de contenedores compartan origen y destino, y por tanto sean transportados en los mismos buques y trenes. Cada conjunto de contenedores puede ser manipulado únicamente por una grúa en los procesos de carga y de descarga.
- Los tiempos de operación de descarga y de carga se consideran dependientes de la capacidad de trabajo de las grúas.

4.2.2 Variables de la planificación

Para conseguir minimizar los tiempos de servicio de la terminal, la planificación debe determinar los horarios de llegada de los buques y los trenes dentro de unas ventanas temporales, con el fin de que salgan de la terminal en el menor tiempo posible. El resultado será la asignación de instantes de llegada de los buques y trenes, la asignación de las grúas a dichos buques y la programación de las mismas. Entre las variables del problema se encuentran:

T: Conjunto de trenes que forman parte de la planificación.

V: Conjunto de buques que forman parte de la planificación.

TC: Conjunto de grúas que cargan y descargan contenedores en los trenes.

VC: Conjunto de grúas que cargan y descargan contenedores en los barcos.

CUT_{ij}: Variable binaria. Toma el valor 1 si el contenedor *i* se descarga desde el tren *j*, y 0 en caso contrario.

CLT_{ij}: Variable binaria. Toma el valor 1 si el contenedor *i* se carga en el tren *j*, y 0 en caso contrario.

CUV_{ij}: Variable binaria. Toma el valor 1 si el contenedor *i* se descarga desde el buque *j*, y 0 en caso contrario.

CLV_{ij}: Variable binaria. Toma el valor 1 si el contenedor *i* se carga desde el buque *j*, y 0 en caso contrario.

TuC: Instante de descarga de un contenedor.

TIC: Instante de carga de un contenedor.

TinT: Instante de llegada de tren.

ToutT: Instante de salida de tren.

TinV: Instante de llegada de buque.

ToutV: Instante de salida de buque.

Este resultado da lugar a una importante reducción de costes debido al mejor aprovechamiento de los recursos disponibles en la terminal.

4.2.3 Función objetivo

El objetivo del problema es minimizar la suma total de los tiempos de servicio en la terminal, es decir, el tiempo que pasan los buques y trenes en la terminal intermodal. Para ello se asignan los tiempos de entrada de los diferentes transportes, T_{inT} y T_{inV} . Los barcos y trenes abandonan la terminal cuando se han terminado las operaciones de carga sobre los mismos, por lo que los instantes de salida, T_{outT} e T_{outV} se asignan en función del instante de llegada, siendo anterior la salida si existe disponibilidad de grúas en el momento en el que el buque o tren llega a la terminal. Por tanto, la mejor solución no estará siempre asociada a que los trenes y los barcos hagan su entrada en la terminal tan pronto como lo permita su ventana temporal, ya que la disponibilidad de las grúas es determinante para terminar en el menor tiempo posible el intercambio intermodal.

Así, en un problema genérico con N buques y M trenes, se puede representar la función objetivo como

$$\text{Min} \sum_i T_{outV_i} + \sum_j T_{outT_j} , i \in N; j \in M$$

4.2.4 Restricciones del problema

La complejidad del problema presentado tiene su impacto en el número de restricciones que aparecen a la hora de plantear una solución válida a la planificación. Se supone un problema en el que hay que gestionar el intercambio intermodal entre N buques y M trenes en una terminal, donde se cuentan con Q grúas que pueden operar en muelles y R grúas para operar sobre los trenes. El conjunto total de contenedores se representa por C -CUV para los contenedores que llegan a la terminal en buque y CUT para los contenedores que llegan a la terminal en tren; CLV y CLT para los contenedores que son cargados en buques y trenes respectivamente-, los cuales se descargan en el instante UC y se cargan en el instante LC . Las restricciones a tener en cuenta en el problema son:

- Un contenedor no puede ser cargado antes de ser descargado.

$$UC_i < LC_i \quad \forall i \in C$$

- Tanto los trenes como los buques deben entrar en la terminal en un instante dentro de su ventana temporal.

$$EaT_i \leq TinV_i \leq LaT_i \quad \forall i \in N$$

$$EaT_i \leq TinT_i \leq LaT_i \quad \forall i \in M$$

- Los contenedores no pueden comenzar a ser descargados antes de que el tren o buque que lo transporta haya llegado a la terminal.

$$TinV_i < TuC_j \cdot CLV_{ji} \quad \forall i \in N, \forall j \in C$$

$$TinT_i < TuC_j \cdot CLT_{ji} \quad \forall i \in M, \forall j \in C$$

- Los barcos y los trenes no pueden salir de la terminal hasta que no han sido completamente cargados.

$$ToutV_i > TLC_j \cdot CLV_{ji} \quad \forall i \in N, \forall j \in C$$

$$ToutT_i > TLC_j \cdot CLT_{ji} \quad \forall i \in M, \forall j \in C$$

Nota: Debido a que la resolución del problema se lleva a cabo empleado un método heurístico, no es necesaria la representación matemática de todas las restricciones del sistema.

4.3 Ejemplo conceptual

Sea una terminal intermodal a la que deben llegar 3 trenes cargados cada uno con 2 conjuntos de contenedores y 2 buques cargados con 3 conjuntos de contenedores cada uno. Cada tren y cada buque tiene una ventana temporal dentro de la cual pueden hacer su entrada a la terminal, definida por un *early arrival time* (EaT) y un *last arrival time* (LaT). Se consideran los datos reflejados en la Tabla 3:

Identificador	EaT	LaT	Contenedores a descargar	Contenedores a cargar
Buque 1	5	20	A, B, C	G, I, L
Buque 2	15	45	D, E, F	H, J, K
Tren 1	25	45	G, H	A, D
Tren 2	10	25	I, J	C, E
Tren 3	20	50	K, L	F, B

Tabla 3. Datos de entrada del problema

El tiempo de carga y descarga de cada conjunto de contenedores se estima constante, de duración 5. Se suponen que existen dos grúas pórticos capaces de descargar y cargar contenedores en los buques, y otras dos grúas que pueden operar sobre los trenes.

El problema consiste en determinar un instante de llegada a cada buque y a cada tren, así como asignar las tareas de carga y descarga a las diferentes grúas. El objetivo es que el intercambio intermodal se realice lo antes posible, por lo que se busca minimizar la suma total de los instantes de salida.

Una solución lógica sería decidir que cada buque y cada tren entre en la terminal tan pronto como su ventana temporal lo permita. Para la gestión de grúas, una opción es decidir realizar todas las descargas antes de ejecutar las cargas de contenedores. En la Tabla 4 se refleja la programación de dicha gestión.

Instante	5	10	15	20	25	30	35	40
Grúa B1	Unload A	Unload C	Unload D	Unload F		Load H	Load I	Load J
Grúa B2	Unload B		Unload E			Load G	Load L	Load K
Grúa T1		Unload I		Unload K	Unload H	Load A	Load C	Load F
Grúa T2		Unload J		Unload L	Unload G	Load D	Load E	Load B

Tabla 4. Programación de grúas priorizando descargas

Esta programación daría como resultado los siguientes instantes de salida, considerando que cada buque y cada tren abandona de la terminal cuando ha terminado de ser cargado son los recogidos en la Tabla 5:

Identificador	Instante de Salida
Buque 1	40
Buque 2	45
Tren 1	35
Tren 2	40
Tren 3	45
TOTAL	205

Tabla 5. Instantes de salida priorizando descargas

Un nuevo criterio, donde se priorice las cargas de contenedores ante las descargas, daría lugar a la programación reflejada en la Tabla 6.

Instante	5	10	15	20	25	30	35	40
Grúa B1	Unload A	Unload C	Unload D	Unload F		Load H	Load I	Load J
Grúa B2	Unload B		Unload E			Load G	Load L	Load K
Grúa T1		Unload I	Load C	Load E	Unload H	Load A	Unload K	Load F

Grúa T2	Unload J	Unload L	Unload G	Load D	Load B
----------------	----------	----------	----------	--------	--------

Tabla 6. Programación de grúas priorizando cargas

Esta programación daría como resultado los siguientes instantes de salida, considerando que cada buque y cada tren abandona de la terminal cuando ha terminado de ser cargado son los recogidos en la Tabla 7.

Identificador	Instante de Salida
Buque 1	40
Buque 2	45
Tren 1	35
Tren 2	25
Tren 3	45
TOTAL	190

Tabla 7. Instantes de salida priorizando cargas

Se observa cómo se ha conseguido reducir sustancialmente la suma total de los instantes de salida con respecto al criterio de priorizar las descargas de los buques y trenes. Sin embargo, el criterio de dar prioridad a las cargas de los buques y los trenes no tiene por qué se la mejor opción para resolver el problema, por lo que es imprescindible el desarrollo de un algoritmo capaz de ofrecer buenas soluciones en escenarios complejos.

5 METODOLOGÍA: EL RECOCIDO SIMULADO

El problema presentado se corresponde con un problema de optimización de tipo no polinomial complejo (NP). La alta complejidad del problema hace que la resolución del mismo a través de métodos exactos se limite a problemas de un tamaño reducido. Para este tipo de problemas, el número de soluciones posibles crece exponencialmente a medida que el número de variables y restricciones aumentan, por lo que se puede concluir que la búsqueda exhaustiva de todas las soluciones con el fin de encontrar el óptimo no es factible para problemas de un tamaño considerable. Por tanto, ante la dificultad de emplear métodos exactos para la búsqueda del óptimo en problemas complejos, en la literatura se pueden encontrar heurísticas y metaheurísticas destinadas a la resolución de este tipo de problemas. La RAE define una heurística como “*manera de buscar la solución de un problema mediante métodos no rigurosos, como por tanteo, reglas empíricas, etc.*” En la misma línea, (Arbelaitz 2002) define:

- Técnica que explora buenas soluciones, cercanas al óptimo, en un tiempo computacional razonable, sin poder garantizar ni factibilidad ni optimalidad y en muchos casos incapaz de indicar la distancia a la que queda el óptimo.
- Conjunto de procedimientos simples, a menudo basados en el sentido común, que se supone ofrecerá una buena solución, aunque no necesariamente óptima, a problemas difíciles de un modo fácil y rápido.

Se deduce que la utilización de heurísticas no garantiza encontrar un óptimo global ni local. Por el contrario, los métodos heurísticos no requieren especificación matemática completa del sistema, por lo que se consiguen modelos más “realistas” que los empleados en los métodos exactos. Esto lleva a la cuestión de si es mejor conseguir una solución exacta de un modelo aproximado o una solución aproximada de un modelo “exacto”.

El principal motivo para utilizar heurísticas ante modelos exactos es el tiempo de ejecución, mucho menor en las heurísticas. Además, las heurísticas cuentan con otra ventaja ante los métodos exactos, y es la mayor flexibilidad en el manejo de las características del modelo, lo que hace que sean más explicativos.

Por otro lado, el mayor inconveniente de las heurísticas no es sólo que no garantizan el óptimo, sino que tampoco ofrecen información de la bondad de la solución obtenida. Por tanto, si se necesita una solución

precisa, debería emplearse un método exacto.

Las metaheurísticas se basan en dotar a una heurística de una guía de acuerdo a algún concepto de la naturaleza, la biología, la inteligencia artificial, las matemáticas o la física. El objetivo es orientar a la heurística modificando las soluciones que ofrecen las heurísticas para encontrar otra mejor hasta que no se pueda encontrar ninguna solución que presente mejora en el vecindario de la solución actual. El vecindario de una solución se define como el conjunto de soluciones obtenidas a partir de la misma por medio de una operación básica llamada movimiento. Los movimientos más comunes para pasar de una solución a otra son:

- **Descenso aleatorio:** Cada movimiento se hace eligiendo una solución aleatoria del vecindario. El proceso termina cuando todas las soluciones del vecindario sean peores que la solución actual.
- **Método descendente de la mayor pendiente:** Se exploran todas las soluciones del vecindario. El movimiento se hace a la mejor solución del mismo.

El gran inconveniente de estos procesos a simple vista es la posibilidad de caer en un óptimo local. Para contrarrestar esto, las metaheurísticas deben ser capaces de escapar de los óptimos locales para intentar encontrar el óptimo global.

5.1 Introducción a la heurística de Recocido Simulado

El recocido simulado, también denominado *Simulated Annealing* (en adelante, SA), enfriamiento simulado, método descendente probabilístico, o relajación estocástica, es un algoritmo de búsqueda metaheurística de optimización global, basado en el proceso de recocido del acero y las cerámicas para obtener material cristalizado. Esta técnica consiste en calentar el material para dotar a los átomos de energía y que así puedan desplazarse. Posteriormente, se deja enfriar el material lentamente para hacer que recristalice en configuraciones con menor energía que la inicial. Cuanto más lento sea el procedimiento de enfriamiento del material, mayor probabilidad se tiene de conseguir un cristal perfectamente estructurado con baja energía interna. Las ideas en las que se basa el algoritmo fueron introducidas en (Metropolis et al. 1953), en un algoritmo para simular el proceso de enfriamiento antes descrito. Posteriormente, fue desarrollado independientemente en (Kirkpatrick, Gelatt, y Vecchi 1983) y (Černý 1985) donde se propuso que este algoritmo podía ser empleado para resolver problemas de optimización.

El algoritmo parte de una solución aleatoria. A partir de ella, genera un vecindario de la misma y aleatoriamente se elige una solución perteneciente al vecindario, la cual se evalúa y se compara con la solución inicial. Si la solución nueva es mejor que la anterior, se adopta esta nueva solución y se examina su vecindario. Este procedimiento se repite hasta que se alcanza una condición de parada. Para evitar caer en óptimos locales, el recocido simulado permite el movimiento hacia soluciones peores según una determinada probabilidad, la cual disminuye a medida que aumentan las iteraciones mediante un parámetro que se llama Temperatura (T), por analogía con el método de cristalización de materiales. La temperatura parte de valores muy altos y tiende a cero asintóticamente. Para valores muy bajos de T , la probabilidad de transición a una solución peor es prácticamente nula. Otros parámetros del algoritmo son la función de enfriamiento que

marca cómo descende la temperatura, y la longitud de la cadena L , que determina el número de iteraciones que se hacen para cada valor de la temperatura.

El pseudocódigo del algoritmo general es el presentado en la Figura 25:

```

Seleccionar  $t = t_0$  (temperatura inicial), función de enfriamiento  $\alpha(t)$  y longitud
de la cadena  $L$ 
contador_iteraciones = 0
Seleccionar  $s_0$ , solución inicial aleatoria
Repetir
    Repetir
        Seleccionar  $s \in N(s_0)$ 
         $\delta = f(s) - f(s_0)$ 
        si  $\delta < 0$ 
            entonces  $s_0 = s$ 
        si no
            si num_aleatorio  $\in [0,1) < e^{-\delta/t}$ 
                entonces  $s_0 = s$ 
        contador_iteraciones ++
    Hasta contador_iteraciones =  $L$ 
 $t = \alpha(t)$ 
Hasta condición de parada
  
```

Figura 25. Pseudocódigo del recocido simulado

Como puede observarse, en el algoritmo hay parámetros no específicos que dependerán del problema al que se quiera aplicar el método. Las decisiones a tomar se pueden dividir en dos tipos:

- Decisiones relativas a los parámetros del proceso: Temperatura inicial t_0 , longitud de la cadena L , función de enfriamiento $\alpha(t)$ y condición de parada.
- Decisiones relativas al problema específico: Estructura de la solución, coste asociado a una solución, solución inicial (s_0), y la estructura del vecindario $N(s_0)$.

La elección correcta del vecindario es muy importante para el correcto funcionamiento del algoritmo, donde debe haber un número limitado de movimientos desde una solución hasta otra. Cuando se puede asegurar que cualquier solución se puede alcanzar a partir de otra en un número limitado de movimientos, el proceso converge independientemente de la solución inicial s_0 .

La convergencia del algoritmo de Recocido Simulado está demostrada en la literatura. Sin embargo, la elección correcta de parámetros condiciona la velocidad a la que converge el algoritmo. Como es de esperar, cuantas más soluciones sean evaluadas, mayor será la probabilidad de encontrar la solución óptima, pero supondrá un mayor coste computacional.

La experiencia demuestra que la fijación correcta de los parámetros del algoritmo, tanto los relativos al proceso como los relativos al problema, debe hacerse tras una larga experimentación. Este proceso supone el más costoso a la hora de definir el algoritmo, ya que una vez que los parámetros quedan fijados la implantación es muy sencilla.

5.2 El recocido simulado en problemas de optimización

A lo largo de los últimos años, diversos autores han empleado algoritmos basados en SA para resolver problemas de optimización combinatoria. La adecuación de la heurística de recocido simulado a problemas de optimización ha dado lugar a que se hayan resuelto problemas muy diversos desarrollando algoritmos.

Uno de los primeros problemas estudiados fue el VRP resuelto en (Osman 1993) donde el autor desarrolla un algoritmo de descenso empleando conceptos de búsqueda tabú y de SA. Una variante de este problema, donde se incluyen ventanas temporales para los diferentes vehículos (*vehicle routing problem with time windows*, VRPTW) fue resuelta en (Thangiah, Osman, y Sun 1994) empleando un algoritmo híbrido, combinando el SA, un algoritmo genético y una búsqueda tabú en. El mismo problema fue resuelto en (Chiang y Russell 1996) desarrollando un algoritmo basado en el recocido simulado.

Otro problema estudiado consiste en resolver un problema multi-objetivo en el que se pretende optimizar la distribución de una planta de producción en (Ji-Yang 2010) el autor desarrolla una mejora al algoritmo SA consistente en una lista tabú para evitar que el algoritmo encuentre varias veces la misma solución. La lista tabú se actualiza con cada nueva solución que se acepta, otorgando mayor capacidad computacional al algoritmo.

En (Nguyen, Tran, y Duong 2009) los autores comparan tres variantes del recocido simulado para resolver el problema complejo de asignación de habitaciones a personas con diferentes preferencias. Se trata de un problema donde se deben tener en cuenta diferentes aspectos a la hora de considerar las preferencias de cada individuo. Las tres variantes del SA descritas por los autores son:

- a) Incluir un recalentamiento con el fin de escapar de mínimos locales.
- b) Emplear una función de enfriamiento exponencial para que el algoritmo converja más rápidamente.
- c) Guiar la búsqueda de mejores soluciones a partir de la información que se obtiene de cada nueva configuración explorada.

El artículo concluye que la opción del recalentamiento es la que ofrece mejores resultados en un tiempo de ejecución razonable.

El problema de asignación cuadrática (*quadratic assignment problem*, QAP) se resuelve empleando la heurística SA en (Wang 2012). El autor sugiere que, a temperaturas bajas del algoritmo, la probabilidad de aceptar soluciones peores es muy reducida, lo que hace que no se explore una parte importante de soluciones factibles. Por ello, se propone una variación del SA basado en la búsqueda tabú, donde los movimientos que aceptan soluciones peores se guardan en una lista tabú con el fin de resetear la configuración como estrategia

para favorecer que el algoritmo escape de mínimos locales.

En (Fernández et al. 2009) se elabora un método híbrido de resolución a un problema de control óptimo de semáforos en dos vías bidireccionales combinando la filosofía de recocido simulado y un método cuasi-Newton adecuado.

Todos estos trabajos incluyen modificaciones del algoritmo simple de recocido simulado con el fin de adaptar la heurística al problema en cuestión. En (Millán Páramo, Begambre Carrillo, y Millán Romero 2014) los autores presentan una modificación del algoritmo SA para la optimización de diferentes problemas de ingeniería, persiguiendo mejorar la capacidad computacional del algoritmo clásico SA. Dicha modificación se basa en tres características:

- a) Exploración preliminar: Se evalúan un número determinado de configuraciones con la función objetivo del problema. Se escoge como punto de partida del algoritmo la configuración que tenga menor valor de las evaluadas.
- b) Paso de búsqueda: Esta modificación consiste en reducir el tamaño del vecindario explorado a medida que disminuye la temperatura. Esto permite que el algoritmo realice una exploración global a temperaturas altas y una exploración local a temperaturas bajas, dando un equilibrio entre la exploración y la explotación del algoritmo.
- c) Probabilidad de aceptación: En esta propuesta la probabilidad de aceptación de una solución (estado) peor viene dada por:

$$P = \frac{1}{1 + e^{\frac{\Delta f}{T}}}$$

P: probabilidad de aceptar el nuevo estado.

Δf : diferencia de las evaluaciones de la función para cada estado.

T: temperatura del sistema.

e: número de Euler.

Esta probabilidad se encuentra en un intervalo entre 0 y $\frac{1}{2}$, lo que permite al algoritmo tener un rango menor de aceptación de peores soluciones.

Además, en la literatura se encuentran también procedimientos basados en SA para resolver problemas tan diferentes como son el acarreo terrestre del transporte intermodal (Cuberos 2014), la secuenciación de tareas (Díaz Martínez, Fernández Menéndez, y Et Al. 2004) o la detección de patrones en señales sísmicas reales (Huang y Hsieh 2011).

5.3 Adaptación del recocido simulado al problema de secuenciación y programación de grúas

La adaptación de una heurística a un problema es un proceso costoso que requiere el conocimiento conjunto

de ambos factores. Existe una analogía entre el proceso de recalentamiento usado en termodinámica y la heurística basada en dicho proceso adaptada a problemas de optimización. Por un lado, una configuración cualquiera de la materia recalentada se considera una solución factible del problema. La configuración de mínima energía interna, aquella que se pretende alcanzar, se corresponde con la solución óptima. La energía interna de cada configuración es lo que cuantifica la bondad de una solución. En el caso de un problema de optimización, este valor se obtiene con la evaluación de las soluciones con una función objetivo. Por último, la temperatura en el proceso de recocido se considera en los problemas de optimización un parámetro de control. A dicho parámetro se asocian aspectos como la condición de parada y la probabilidad de aceptar una solución de peor calidad.

Dicha analogía queda reflejada en la Tabla 8.

Proceso de recocido	Adaptación a problemas de optimización
Configuración	Solución factible
Configuración de mínima energía interna	Solución óptima
Energía interna de la configuración	Costes asociados a una solución
Temperatura	Parámetro de control

Tabla 8 Analogía entre el algoritmo original y su adaptación a problemas de optimización

5.3.1 Parámetros del algoritmo

El principal atractivo de la heurística SA es su convergencia al óptimo del problema si el algoritmo se encuentra correctamente parametrizado. Por tanto, conocer el papel de cada uno de los parámetros en el funcionamiento del algoritmo es capital para poder llevar a cabo la necesaria parametrización.

5.3.1.1 Temperatura

La temperatura es un parámetro propio del algoritmo, que sirve para marcar la variación de la probabilidad de aceptar una solución peor con el fin de no caer en mínimos locales. Se parte de una temperatura inicial que se fija por la experiencia. A medida que la temperatura decrece, la probabilidad de aceptar una solución con mayor coste disminuye. Las funciones de enfriamiento más utilizadas para este tipo de problemas son:

- Descenso exponencial: $t_{k+1} = \beta \cdot t_k$, donde β es un valor menor que 1. Generalmente, $\beta \in (0.8, 0.99)$ es el parámetro que marca la velocidad de enfriamiento, siendo ésta mayor cuanto menor sea β .
- Esquema de Cauchy: $t_k = t_0 / (1 + k)$, siendo k el número de iteración.
- Esquema de Cauchy modificado: $t_{k+1} = t_k / (1 + \beta \cdot t_k)$, donde β es un valor positivo próximo a 0. La velocidad de enfriamiento será menor cuanto más bajo sea el valor de β . Permite controlar el número de iteraciones.
- Criterio de Boltzman: $t_k = t_0 / (1 + \log(k))$, siendo k el número de iteración.

- $t_{k+1} = t_k - C$, donde C es una constante que marca el ritmo de descenso de la temperatura.

En el presente trabajo se considera la función de enfriamiento que sigue el esquema de Cauchy modificado, por ser su comportamiento el más apropiado para el algoritmo, ya que ofrece un enfriamiento rápido a temperaturas altas, donde la probabilidad de aceptar soluciones de peor calidad es alta, y un enfriamiento lento a temperaturas bajas. Asociado al concepto de la temperatura y la función de enfriamiento aparecen dos parámetros: la temperatura inicial, t_0 , y la velocidad de enfriamiento, definida por el parámetro β .

5.3.1.2 Condición de parada

La condición de parada más común es fijar una temperatura mínima, **tmin**. En el presente trabajo se consideran dos opciones. Además de un valor mínimo para la temperatura, se fija el número máximo de iteraciones que hace el algoritmo sin actualizar la solución, **MaxIter**. Otras opciones son fijar el número de cambios en la temperatura que debe llevarse a cabo, o establecer el número máximo de veces que el algoritmo acepta una solución de peor calidad.

5.3.1.3 Longitud de la cadena

Este parámetro marca el número de iteraciones que debe hacerse para cada valor de la temperatura. Con ello se permite hacer búsquedas más exhaustivas a temperaturas bajas, donde la posibilidad de aceptar soluciones de peor calidad es muy reducida.

5.3.1.4 Tamaño de la vecindad

El SA es un algoritmo de optimización iterativo. En cada iteración, se evalúa la solución actual, se crea un vecindario de la misma, se elige aleatoriamente una solución perteneciente a dicho vecindario y esta nueva configuración se adopta como solución si se cumplen determinadas condiciones. Resulta por tanto determinante considerar el tamaño de los vecindarios creados como un parámetro a tener en cuenta a la hora de resolver un problema de optimización de manera eficiente.

5.3.2 Funcionamiento del algoritmo

El algoritmo programado basado en la heurística de recocido simulado requiere múltiples funciones para las diferentes operaciones que se llevan a cabo en el proceso de búsqueda de una solución.

En primer lugar, se crea una estructura que recoge toda la información que requiere una solución. Esto incluye toda la información asociada a los buques y los barcos (ventanas temporales, contenedores que deben descargarse, contenedores que deben ser cargados, instante de llegada a la terminal, e instante de partida de la terminal). Esta estructura se completa de manera aleatoria, incluyendo:

- Asignación de instantes de llegada a los buques y a los trenes respetando las correspondientes ventanas temporales.
- Secuencia de descarga y de carga de contenedores de los trenes. En el caso de los buques la secuencia

se considera un dato dado por un plan de estiba.

- Programación de las operaciones de las diferentes grúas, tanto de descarga como de carga de contenedores.

Una vez se tiene la solución inicial aleatoria (s_0), ésta se evalúa en la función objetivo $f(s)$. Dicha función consiste en calcular la suma total de los instantes de salida de los trenes y los buques, a partir de los instantes de llegada y la programación de las grúas, pues se consideran que los transportes abandonan la terminal una vez han sido cargados totalmente. A partir de la solución inicial, se da paso a la primera iteración.

En primer lugar se genera el vecindario de la solución, $N(s_0)$. Para la creación de cada vecino, se elige al azar un tren y un barco de la solución. A ese tren seleccionado se le asigna otro instante de llegada al azar respetando su ventana temporal, y otras secuencias de descarga y carga de contenedores. Análogamente, al buque seleccionado se le asigna otro instante de llegada al azar.

A continuación se elige una solución del vecindario al azar, $s' \in N(s_0)$, y se calcula su coste evaluándola en la función objetivo $f(s')$. Esta nueva solución se adopta como solución con una probabilidad P , que depende de la mejora de la nueva solución respecto a la anterior, $\delta = f(s') - f(s_0)$:

Diferencias valor de la solución	¿La solución mejora?	Probabilidad de aceptación
$\delta \leq 0$	Sí mejora	1
$\delta > 0$	No mejora	$e^{\frac{-\delta}{t}}$, siendo t el valor de la temperatura en la iteración

Tabla 9. Probabilidades de aceptar nueva solución

Este proceso se repite tantas veces como indique el parámetro L del algoritmo.

Una vez se ha repetido la búsqueda de mejores soluciones vecinas L veces, se reduce la temperatura a partir de la función de enfriamiento, $\alpha(t)$. Esto hace que en las siguientes iteraciones la probabilidad de aceptación de soluciones en situaciones de no mejora decrezca. El algoritmo sigue buscando soluciones mejores hasta que se alcanza un valor de la temperatura mínima **tmin**, o hasta que se han realizado un número concreto de iteraciones sin que se haya actualizado la solución, **MaxIter**, que son las condiciones de parada establecidas.

Esta búsqueda converge a la solución óptima del problema, tal y como se aprecia en la Figura 26, donde el eje vertical muestra el valor de la función objetivo y en el eje horizontal se aprecia el número de iteraciones realizadas. Una correcta parametrización consigue establecer un equilibrio entre la bondad de la solución alcanzada -en cuanto a la diferencia entre ésta y el valor óptimo del problema-, y el coste computacional requerido para hallar dicha solución.

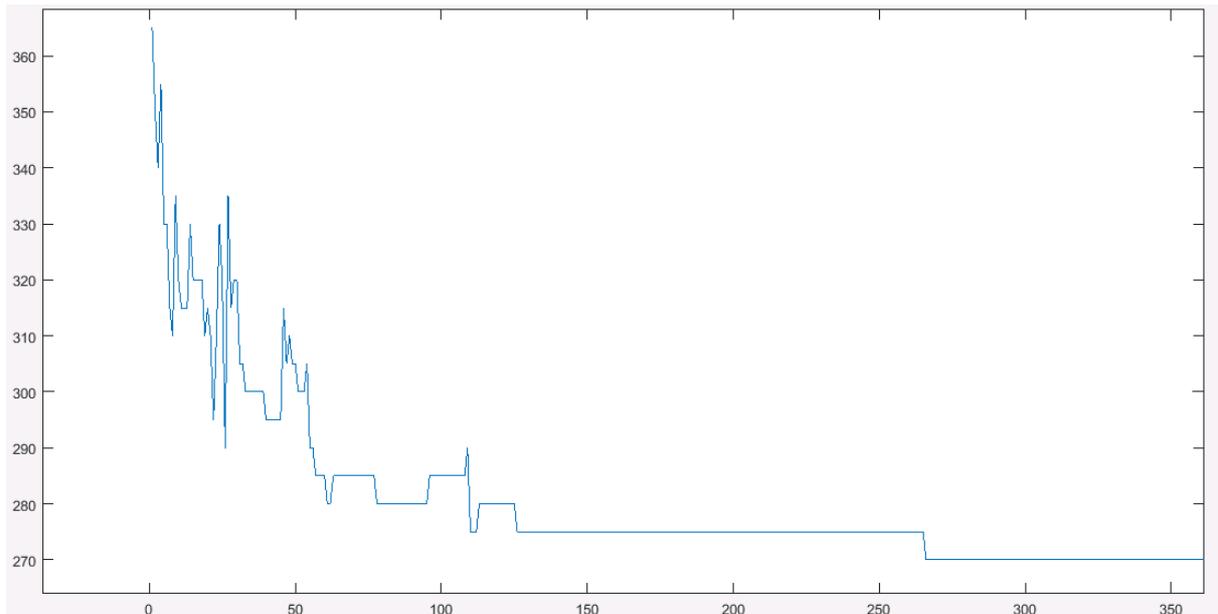


Figura 26. Visualización del comportamiento convergente del algoritmo

5.3.3 Codificación de la solución

La resolución del problema consiste en asignar a los buques y a los trenes un instante de llegada dentro de su ventana temporal a partir del cual se inicia el proceso del intercambio intermodal. La planificación determina que dicho intercambio concluye cuando todos los buques y los trenes abandonan la terminal. Al considerarse que los buques y los trenes salen de la terminal cuando se les han cargado los contenedores pertinentes, se debe incluir en la solución el instante de salida de cada tren y cada buque. Por tanto la codificación de la solución se expresa como aparece en la

	Identificador	Inicio Ventana Temporal	Fin Ventana Temporal	Instante de llegada	Instante de salida
BUQUES	B001	5	20	5	40
	B002	15	45	15	45

Tabla 10. Codificación de la solución de los buques

	Identificador	Inicio Ventana Temporal	Fin Ventana Temporal	Instante de llegada	Instante de salida
TRENES	T001	25	45	25	35
	T002	10	25	10	25
	T003	20	50	20	45

Tabla 11. Codificación de la solución de los trenes

Las asignaciones de los instantes de llegada se toman en función de la disponibilidad de las grúas encargadas de las operaciones de descargar y cargar los contenedores. Por tanto, la codificación de la solución incluye la programación de las grúas especificando qué tareas ejecutan en cada instante de tiempo. Las operaciones de carga se representan con '1', mientras las operaciones de descarga son identificadas con '-1'. En la Tabla 12 se muestra un ejemplo de la codificación de la programación de una grúa de buque.

Grúa de buque 1	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4	Tarea 5	Tarea 6	Tarea 7
Tipo de operación	-1	-1	-1	-1	1	1	1
Contenedor	A	C	D	F	H	I	J
Instante	5	10	15	20	30	35	40

Tabla 12. Programación de una grúa de buque

6 RESULTADOS

Con el fin de verificar la validez del algoritmo, se ha elaborado una batería de problemas cuya resolución ofrece una visión global sobre el comportamiento del algoritmo ante el problema de optimización presentado. Dicha batería, ha sido también resuelta empleando otras heurísticas muy comunes en problemas de optimización, como son un algoritmo genético y una búsqueda tabú, con el fin de comparar y evaluar el comportamiento de la heurística de recocido simulado.

6.1 Batería de problemas

La batería de problemas propuesta consta de 16 escenarios. En cada uno de ellos se lleva a cabo la asignación de instantes de llegada a un determinado número de buques y trenes, así como la programación de las grúas para cubrir todas las tareas de carga y descarga de contenedores, con el objetivo de minimizar la suma total de todos los instantes de salida.

Los archivos de entrada deben contener toda la información necesaria para resolver el problema:

- Número de buques que llegan a la terminal.
- Número de trenes que llegan a la terminal.
- Número de grúas para descargar y cargar los buques.
- Número de grúas para descargar y cargar los trenes.
- Contenedores a descargar de cada buque y de cada tren.
- Contenedores a cargar en cada buque y en cada tren.
- Ventana temporal de entrada a la terminal de cada buque y cada tren.
- Capacidad de operación de cada grúa, expresada en tiempo que necesita para descargar y cargar un conjunto de contenedores.

Los 16 casos posibles se corresponden con cuatro casos de entradas de trenes y buques cargados con contenedores. Cada uno de los cuatro casos se ha resuelto a su vez con cuatro escenarios diferentes de disponibilidad de grúas. En la Tabla 13 se muestran resumidos los 16 escenarios de la batería.

Escenario	Nº Buques	Nº Trenes	Nº Grúas Buque	Nº Grúas Tren
Escenario 1	2	3	1	1
Escenario 2	2	3	2	2
Escenario 3	2	3	3	3
Escenario 4	2	3	4	4
Escenario 5	2	4	1	1
Escenario 6	2	4	2	2
Escenario 7	2	4	3	3
Escenario 8	2	4	4	4
Escenario 9	5	10	1	1
Escenario 10	5	10	2	2
Escenario 11	5	10	3	3
Escenario 12	5	10	4	4
Escenario 13	10	20	1	1
Escenario 14	10	20	2	2
Escenario 15	10	20	3	3
Escenario 16	10	20	4	4

Tabla 13. Escenarios de la batería de problemas

El algoritmo programado resuelve el problema presentado de manera eficiente. Para hacer comprensible la solución propuesta, se genera un archivo en el que se reflejan las asignaciones dadas. Esta información se representa en forma de tablas.

A modo de ejemplo, se plasma la representación de la solución del escenario 3, en el que hay que programar la carga y descarga de contenedores de dos buques y tres trenes, contando con tres grúas para operar sobre buques y tres grúas de trenes. En la Tabla 14 se observa la representación de la solución para las entidades buque, y de forma análoga en la Tabla 15 se muestra la solución para los trenes.

BUQUES	Identificador	Inicio ventana temporal	Fin ventana temporal	Instante de llegada	Instante de salida
	B001	10	40	10	35
B002	20	50	20	30	

Tabla 14. Representación de solución de los buques

TRENES	Identificador	Inicio ventana temporal	Fin ventana temporal	Instante de llegada	Instante de salida
	T001	5	35	15	35
T002	15	45	15	25	
T003	25	55	25	35	

Tabla 15. Representación de solución de los trenes

En las tablas se refleja el instante de salida de cada entidad, que es lo que se pretende minimizar en este problema. En esta situación, el valor de la función objetivo -suma de los instantes de salida-, es de 160. Además de este valor, el tiempo computacional empleado por el algoritmo también se exporta en la solución.

Por otro lado, la resolución del problema también se ocupa de asignar a cada grúa una tarea en cada instante de tiempo. En la nomenclatura usada se les ha denominado a las tareas de carga como operaciones de tipo 1, y a las de descarga tipo -1. Estas asignaciones también se exportan en forma de tabla, como se muestra a modo de ejemplo. (Ver Tabla 16, Tabla 17, Tabla 18, Tabla 19, Tabla 20 y Tabla 21).

Grúa de buque 1	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4	Tarea 5	Tarea 6
Tipo de operación	-1	-1	1	1	1	1
Contenedor	Ab	Db	Jb	lb	Lb	Gb
Instante	10	20	25	30	35	45

Tabla 16. Asignación de tareas a la grúa de buque 1

Grúa de buque 2	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4	Tarea 5
Tipo de operación	-1	-1	1	1	1
Contenedor	Bb	Eb	Gb	Kb	Hb
Instante	10	20	25	30	35

Tabla 17. Asignación de tareas a la grúa de buque 2

Grúa de buque 3	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4	Tarea 5
Tipo de operación	-1	-1	1	1	-
Contenedor	Cb	Fb	Hb	Lb	-
Instante	10	20	25	30	-

Tabla 18. Asignación de tareas a la grúa de buque 3

Grúa de tren 1	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4	Tarea 5
Tipo de operación	-1	-1	-1	1	-1
Contenedor	Hb	Ib	Kb	Cb	Kb
Instante	15	20	25	30	30

Tabla 19. Asignación de tareas a la grúa de tren 1

Grúa de tren 2	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4	Tarea 5
Tipo de operación	-1	1	-1	1	1
Contenedor	Gb	Bb	Lb	Eb	Bb
Instante	15	20	25	30	35

Tabla 20. Asignación de tareas a la grúa de tren 2

Grúa de tren 3	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4	Tarea 5
Tipo de operación	-1	1	1	1	-
Contenedor	Jb	Ab	Fb	Db	-
Instante	15	20	25	30	-

Tabla 21. Asignación de tareas a la grúa de tren 3

6.2 Resultados

Para calificar la adecuación de la heurística al problema resuelto, se han comparado los resultados alcanzados con el algoritmo de recocido simulado con los ofrecidos por otros dos algoritmos, uno basado en una búsqueda tabú y un algoritmo genético.

Con el fin de encontrar una buena relación entre la bondad de la solución y el tiempo computacional requerido, se ha llevado a cabo un proceso de parametrización. A partir del mismo se han definido los parámetros que se reflejan en la Tabla 22.

Parámetro	Valor
T_0	50

Parámetro	Valor
T_{\min}	0,3
L	$\begin{cases} 2 & \text{si } 10 < t < 50 \\ 4 & \text{si } 2 < t < 10 \\ 6 & \text{si } 0,3 < t < 2 \end{cases}$
TamVec	Nº buques + Nº trenes
β	$\begin{cases} 0,01 & \text{escenarios } 1 - 4 \\ 0,02 & \text{escenarios } 5 - 8 \\ 0,03 & \text{escenarios } 9 - 12 \\ 0,06 & \text{escenarios } 13 - 16 \end{cases}$

Tabla 22. Parámetros del algoritmo

Los resultados alcanzados por una y otra heurística se muestran en la Tabla 23.

	Recocido Simulado		Búsqueda Tabú		Algoritmo Genético	
	Tiempo de ejecución	Solución	Tiempo de ejecución	Solución	Tiempo de ejecución	Solución
Escenario 1	49,47	265	268,72	265	11,66	265
Escenario 2	65,93	180	289,04	185	25,33	180
Escenario 3	92,52	160	319,64	160	37,00	160
Escenario 4	124,79	150	351,38	150	52,71	150
Escenario 5	39,50	390	286,69	390	50,88	385
Escenario 6	48,67	245	307,35	245	54,87	245
Escenario 7	69,84	220	345,99	220	50,80	220
Escenario 8	87,47	200	386,10	200	66,45	200
Escenario 9	319,24	2200	562,70	2180	354,39	2125
Escenario 10	274,53	1065	509,52	1075	325,41	1035
Escenario 11	289,21	755	563,11	785	391,71	755
Escenario 12	373,57	620	653,82	655	478,53	620
Escenario 13	1793,86	8700	2175,10	8665	2762,93	8640
Escenario 14	1466,61	4400	1873,02	4285	2545,62	4215
Escenario 15	1273,90	2810	1749,12	2860	2283,95	2765
Escenario 16	1133,67	2230	1567,35	2230	2340,65	2165

Tabla 23. Comparativa de resultados

Se observa que los resultados alcanzados por el algoritmo de recocido simulado son equiparable a los que alcanzan otras heurísticas tanto en la bondad de las soluciones como en tiempos computacionales, si bien es cierto que el algoritmo genético encuentra mejores soluciones en problemas de tamaño grande. En la Figura 27 se muestran los resultados alcanzados en forma de gráfica.

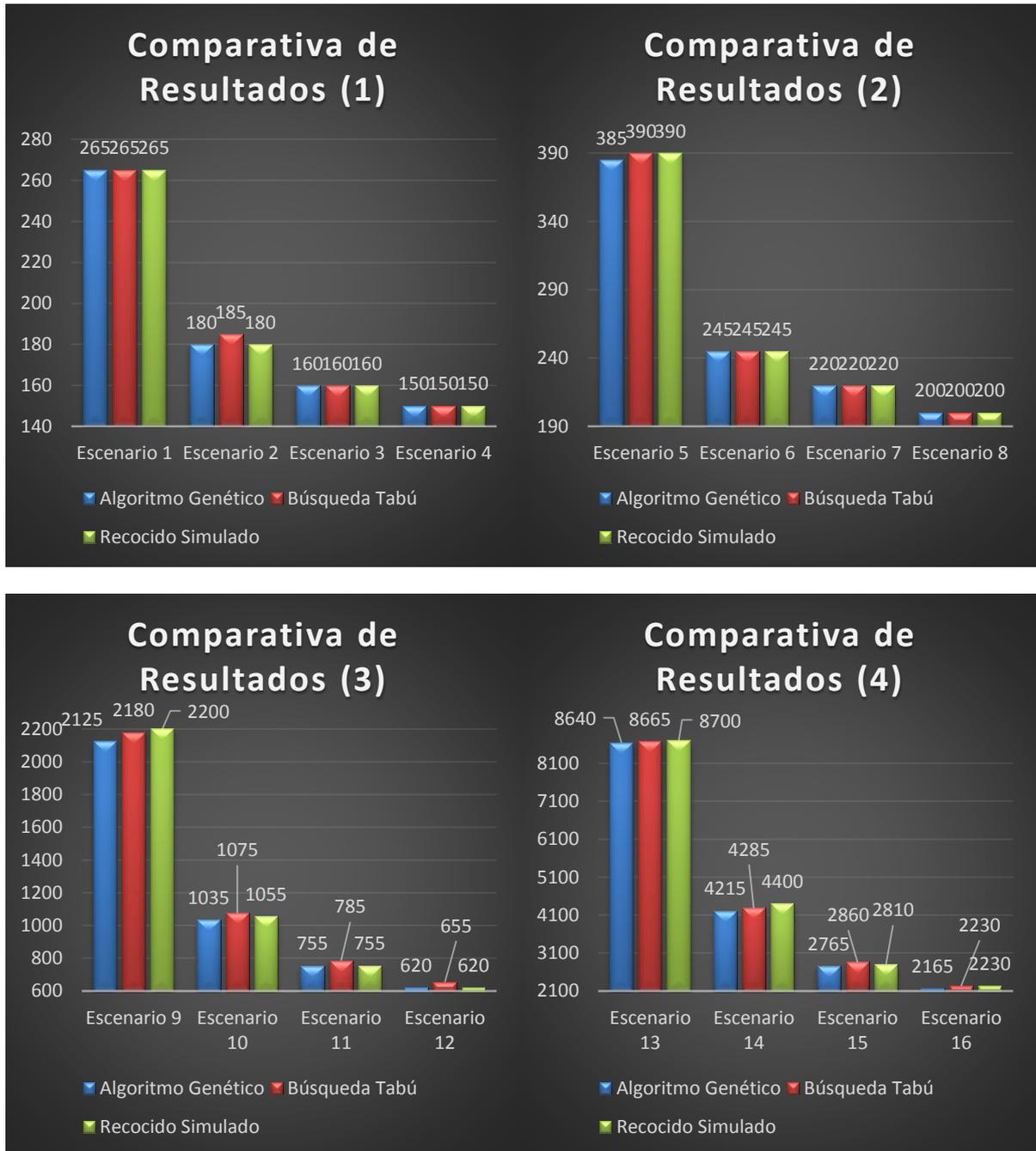


Figura 27. Comparativa de resultados

Se aprecia también como los tiempos computacionales para resolver el problema aumentan a mayor velocidad que el tamaño del mismo debido al carácter NP del problema. Este crecimiento de los tiempos computacionales en todas las heurísticas se plasma en la Figura 28. Especialmente en el escenario 13, donde el tamaño del problema duplica al del escenario anterior (10 buques y 20 trenes ante los 5 buques y 10 trenes del escenario 12).

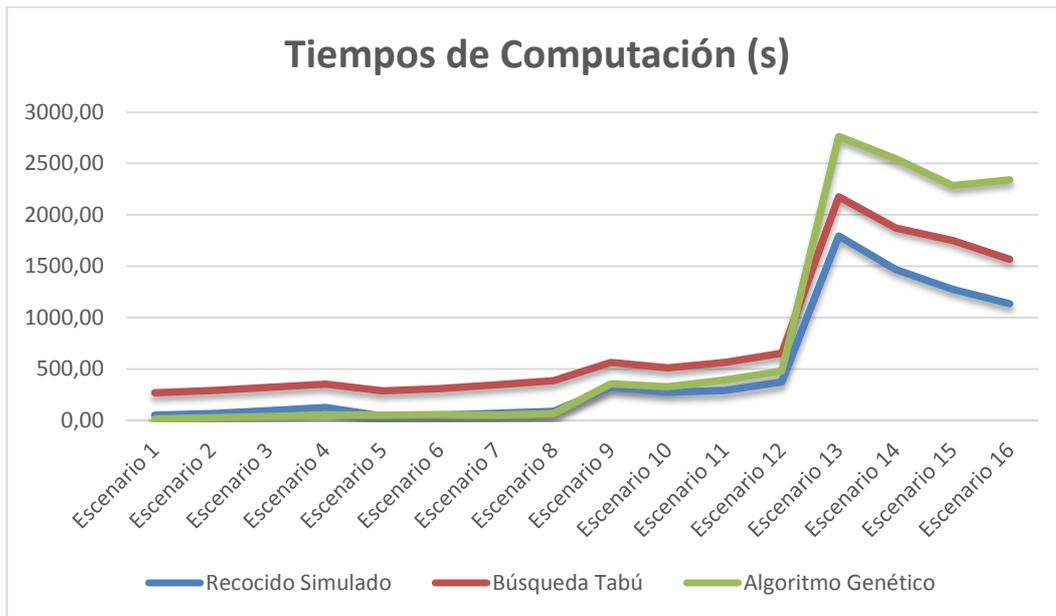


Figura 28. Tiempos de computación

Otro aspecto a considerar es la gran diferencia que se observa entre contar con una grúa de cada tipo o con más grúa, ya que esto permite las cargas y descargas en paralelo y ofrece mucha más flexibilidad en la gestión de las operaciones.

7 CONCLUSIONES

La evolución hacia un mercado mundial globalizado hace del transporte de mercancías una pieza fundamental en el buen funcionamiento del mismo. La cadena logística debe ser clave para conseguir llevar a cabo el transporte de mercancías de manera eficiente. Debido a la necesidad de cubrir distancias cada vez mayores propiciadas por la lejanía entre los focos productores y los consumidores, la tendencia es el transporte intermodal.

El transporte intermodal consta de 3 etapas diferenciadas: el trayecto principal, que cubre grandes distancias; el transporte terrestre, que une la terminal intermodal con los clientes y proveedores; y el transbordo en la terminal, donde se lleva a cabo el cambio de modo de la mercancía. Esta última etapa es de gran complejidad, al reunir muchas operaciones diferentes las cuales deben ser sincronizadas y optimizadas para conseguir una cadena de transporte eficiente.

En esta línea, se ha llevado a cabo un análisis del estado del arte de las diferentes operativas que se deben resolver para gestionar una terminal de manera eficiente, diferenciando las operaciones que se dan en la zona de muelle, la zona de almacenamiento y la zona de transporte terrestre de la terminal. A partir de este análisis se ha remarcado la necesidad de considerar varias operativas integradas en la resolución del problema del intercambio intermodal.

A continuación se ha explicado el problema a resolver, el cual ocupa el problema de asignación de muelles a los buques y la programación de las grúas para agilizar los procesos de carga y descarga, consiguiendo reducir el tiempo que deben pasar los buques y los trenes en la terminal. Para su resolución se ha desarrollado un algoritmo basado en la heurística de recocido simulado para resolver un problema de secuenciación de tareas y programación de grúas con el fin de optimizar el intercambio de mercancías en una terminal intermodal.

El algoritmo se ha aplicado a una batería de 16 problemas y se ha analizado el comportamiento del mismo. Los resultados obtenidos se han comparado a los que se han alcanzado empleando un algoritmo genético y un algoritmo basado en una búsqueda tabú. De esta comparativa se concluye la adecuación de la heurística de recocido simulado al problema resuelto, alcanzando soluciones tan buenas como las ofrecidas por las otras

heurísticas. Además, el comportamiento convergente del algoritmo SA sugiere que el algoritmo es capaz de alcanzar el óptimo del problema aunque para ello requiera tiempos computacionales muy altos.

En cuanto al impacto de los recursos en el problema, es llamativa la relación entre las soluciones alcanzadas en función del número de grúas. A medida que aumenta el número de grúas capaces de descargar y cargar contenedores de los buques y los trenes, las soluciones que alcanza el algoritmo son mejores. Sin embargo, esta mejora no es lineal, lo que lleva a pensar que aumentar continuamente el número de grúas no ofrecerá siempre mejores soluciones. La resolución del problema aporta por tanto información que puede ser determinante para decidir si hacer una adquisición de maquinaria, ya que es posible evaluar de antemano la rentabilidad de dicha adquisición.

8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ambrosino, Daniela, y Davide Anghinolfi. 2010. «An experimental comparison of different heuristics for the master bay plan problem.» En *Experimental Algorithms*, , 314-25.
- Ambrosino, Daniela, Davide Anghinolfi, Massimo Paolucci, y Anna Sciomachen. 2009. «A new three-step heuristic for the master bay plan problem.» *Maritime Economics & Logistics* 11(1): 98-120.
- Ambrosino, Daniela, Anna Sciomachen, y Elena Tanfani. 2004. «Stowing a containership: The master bay plan problem.» *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 38(2): 81-99.
- Arango, Carlos. 2014. «Optimización basada en simulación para la gestión de operaciones de las terminales de contenedores portuarias.»
- Arango, Carlos, Pablo Cortés, Luis Onieva, y Alejandro Escudero. 2013. «Simulation-optimization models for the dynamic berth allocation problem.» *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 28: 769-79.
- Arango, Carlos, Pablo Cortes, y Jesús Muñuzuri Sanz. 2010. «Operativa de transferencia y programación de grúas en la terminal de contenedores del puerto de Sevilla.» (2002): 1138-46.
- Arbelaitz, Olatz. 2002. «Soluciones basadas en Simulated Annealing para el VRPTW.» Universidad del País Vasco.
- Avriel, Mordecai, y Michal Penn. 1993. «Exact and approximate solutions of the container ship stowage problem.» *Computers and Industrial Engineering* 25: 271-74.
- Avriel, Mordecai, Michal Penn, Naomi Shpirer, y Smadar Witteboon. 1998. «Stowage planning for container ships to reduce the number of shifts.» *Annals of Operations Research* 76(1-4): 55-71.
- Bazzazi, Mohammad, Nima Safaei, y Nikbakhsh Javadian. 2009. «A genetic algorithm to solve the storage space allocation problem in a container terminal.» *Computers and Industrial Engineering* 56(1): 44-52.
- Bierwirth, Christian, y Frank Meisel. 2009. «A fast heuristic for quay crane scheduling with interference constraints.» *Journal of Scheduling* 12(4): 345-60.
- . 2010. «A survey of berth allocation and quay crane scheduling problems in container terminals.» *European Journal of Operational Research* 202(3): 615-27.
- Bish, Ebru K. 2003. «A multiple-crane-constrained scheduling problem in a container terminal.» *European Journal of Operational Research* 144(1): 83-107.
- Bortfeldt, Andreas, y Hermann Gehring. 2001. «A hybrid genetic algorithm for the container loading problem.» *European Journal of Operational Research* 131(1): 143-61.
- Braekers, Kris, An Caris, y Gerrit K. Janssens. 2012. «Time-dependent routing of drayage operations in the service area of intermodal terminals.» *International Conference on Harbour, Maritime and Multimodal Logistics Modelling and Simulation* 1: 29-36.

- Canonaco, Pietro, Pasquale Legato, Rina M. Mazza, y Roberto Musmanno. 2008. «A queuing network model for the management of berth crane operations.» *Computers and Operations Research* 35(8): 2432-46.
- Cao, Jin Xin, Der-Horng Lee, Jiang Hang Chen, y Qixin Shi. 2010. «The integrated yard truck and yard crane scheduling problem: Benders' decomposition-based methods.» *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 46(3): 344-53.
- Caris, a., y G.K. Janssens. 2009. «A local search heuristic for the pre- and end-haulage of intermodal container terminals.» *Computers & Operations Research* 36(10): 2763-72.
- Caris, An, y Gerrit K. Janssens. 2008. «A deterministic annealing algorithm for the pre- And end-haulage of intermodal container terminals.» *ESM 2008 - 2008 European Simulation and Modelling Conference: Modelling and Simulation 2008* (2002): 391-98.
- Caserta, Marco, Silvia Schwarze, y Stefan Voß. 2012. «A mathematical formulation and complexity considerations for the blocks relocation problem.» *European Journal of Operational Research* 219(1): 96-104.
- Caserta, Marco, y Stefan Voß. 2009. «A Corridor Method-Based Algorithm for the Pre-marshalling Problem.» *Applications of Evolutionary Computing SE - 89 5484*: 788-97.
- Černý, V. 1985. «Thermodynamical approach to the traveling salesman problem: An efficient simulation algorithm.» *Journal of Optimization Theory and Applications* 45(1): 41-51.
- Chang, Daofang, Zuhua Jiang, Wei Yan, y Junliang He. 2011. «Developing a dynamic rolling-horizon decision strategy for yard crane scheduling.» *Advanced Engineering Informatics* 25(3): 485-94.
- Chao, I-Ming. 2002. «A tabu search method for the truck and trailer routing problem.» *Computers & Operations Research* 29(1): 33-51.
- Chen, Lu et al. 2007. «A tabu search algorithm for the integrated scheduling problem of container handling systems in a maritime terminal.» *European Journal of Operational Research* 181(1): 40-58.
- Cheung, Raymond K, Chung-Lun Li, y Wuqin Lin. 2002. «Interblock Crane Deployment in Container Terminals.» *Transportation Science* 36(1): 79-93.
- Chiang, Wen-Chyuan, y Robert a. Russell. 1996. «Simulated annealing metaheuristics for the vehicle routing problem with time windows.» *Annals of Operations Research* 63(1): 3-27.
- Cuberos, Manuel. 2014. «Heurística de Recocido Simulado para la resolución del problema del acarreo terrestre.»
- Daganzo, Carlos F. 1989. «The crane scheduling problem.» *Transportation Research Part B: Methodological* 23(3): 159-75.
- Dai, Jim, Wuqin Lin, Rajeeva Moorthy, y Chung-Piaw Teo. 2008. «Berth Allocation Planning Optimization in Container Terminals.» *Supply chain analysis*: 1-44.
- Diaz Martinez, Zuleyka, José Fernández Menéndez, y Et Al. 2004. «Secuencion de Tareas en el ambito de la produccion: una aplicación del algoritmo del recocido simulado.» *XII Jornadas de ASEPUMA*: 1-11.

- Van Duin, R., y H. Van Ham. 1998. «A three-stage modeling approach for the design and organization of intermodal transportation services.» *SMC'98 Conference Proceedings. 1998 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (Cat. No.98CH36218)* 4.
- Escudero, Alejandro, Pablo Cortés, Jesús Muñuzuri, y Pablo Aparicio. 2015. «A viral system to optimise the daily drayage problem.» *International Journal of Bio-Inspired Computation* 7(3): 176.
- Escudero, Alejandro, Jesús Muñuzuri, José Guadix, y Carlos Arango. 2013. «Dynamic approach to solve the daily drayage problem with transit time uncertainty.» *Computers in Industry* 64(2): 165-75.
- Expósito-Izquierdo, Christopher, Belén Melián-Batista, y Marcos Moreno-Vega. 2012. «Pre-Marshalling Problem: Heuristic solution method and instances generator.» *Expert Systems with Applications* 39(9): 8337-49.
- Fernández, Lema, S Carmen, Pedreira Andrade, y P Luis. 2009. «Un método híbrido para resolver el problema de control óptimo de semáforos.» *Rect@* 10: 285-98.
- Forster, Florian, y Andreas Bortfeldt. 2012. «A tree search procedure for the container relocation problem.» *Computers & Operations Research* 39(2): 299-309.
- Gambardella, L. M., M. Mastrolilli, a. E. Rizzoli, y M. Zaffalon. 2001. «An optimization methodology for intermodal terminal management.» *Journal of Intelligent Manufacturing* 12(5-6): 521-34.
- Gambardella, L. M., a. E. Rizzoli, y M. Zaffalon. 1998. «Simulation and Planning of an Intermodal Container Terminal.» *Simulation* 71(2): 107-16.
- Goss, R.O. 1990. «Economic policies and seaports: The economics function of seaports.» *Maritime policy & management* 3(17): 207-19.
- Guo, Xi, Shell Ying Huang, Wen Jing Hsu, y Malcolm Yoke Hean Low. 2011. «Dynamic yard crane dispatching in container terminals with predicted vehicle arrival information.» *Advanced Engineering Informatics* 25(3): 472-84.
- Hansen, Ingo. 2004. «Automated shunting of rail container wagons in ports and terminal areas.» *Transportation Planning and Technology* 27(5): 385-401.
- He, Junliang, Daofang Chang, Weijian Mi, y Wei Yan. 2010. «A hybrid parallel genetic algorithm for yard crane scheduling.» *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 46(1): 136-55.
- He, Junliang, Youfang Huang, Wei Yan, y Shuaian Wang. 2015. «Integrated internal truck, yard crane and quay crane scheduling in a container terminal considering energy consumption.» *Expert Systems with Applications* 42(5): 2464-87.
- Ho, Ying-Chin, y Ping-Fong Hsieh. 2004. «A machine-to-loop assignment and layout design methodology for tandem AGV systems with multiple-load vehicles.» *International Journal of Production Research* 42(4): 801-32.
- Hoshino, Satoshi, y Jun Ota. 2007. «Integrated Design Methodology for an Automated Transportation System in a Seaport Terminal.» En *Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, IEEE, 858-63.

- Huang, Ky, y Yh Hsieh. 2011. «Seismic Pattern Detection Using Very Fast Simulated Annealing.» *2011 SEG Annual Meeting (2)*: 1181-86.
- Imai, Akio, Hsieh Chia Chen, Etsuko Nishimura, y Stratos Papadimitriou. 2008. «The simultaneous berth and quay crane allocation problem.» *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 44: 900-920.
- Imai, Akio, Etsuko Nishimura, y Stratos Papadimitriou. 2001. «The dynamic berth allocation problem for a container port.» *Transportation Research Part B: Methodological* 35: 401-17.
- . 2003. «Berth allocation with service priority.» *Transportation Research Part B: Methodological* 37(5): 437-57.
- Imai, Akio, Kazuya Sasaki, Etsuko Nishimura, y Stratos Papadimitriou. 2006. «Multi-objective simultaneous stowage and load planning for a container ship with container rehandle in yard stacks.» *European Journal of Operational Research* 171(2): 373-89.
- Imai, Akio, Xin Sun, Etsuko Nishimura, y Stratos Papadimitriou. 2005. «Berth allocation in a container port: using a continuous location space approach.» *Transportation Research Part B: Methodological* 39(3): 199-221.
- Ji-Yang, Qi Ji-Yang Qi. 2010. «Application of improved simulated annealing algorithm in facility layout design.» *Control Conference (CCC), 2010 29th Chinese*: 5224-27.
- Jones, W Brad, C Richard Cassady, y Royce O Bowden Jr. 2000. «Developing a standard definition of intermodal transportation.» *Transp. LJ* 27: 345.
- Jovanovic, Raka, Milan Tuba, y Stefan Voß. 2015. «A multi-heuristic approach for solving the pre-marshalling problem.» *Central European Journal of Operations Research*.
- Kim, Kap Hwan, y Jong Wook Bae. 2004. «A Look-Ahead Dispatching Method for Automated Guided Vehicles in Automated Port Container Terminals.» *Transportation Science* 38(2): 224-34.
- Kim, Kap Hwan, y Ki Young Kim. 1999. «An Optimal Routing Algorithm for a Transfer Crane in Port Container Terminals.» *Transportation science* 33(1): 17-33.
- Kim, Kap Hwan, y Kang Tae Park. 2003. «A note on a dynamic space-allocation method for outbound containers.» *European Journal of Operational Research* 148: 92-101.
- Kim, Kap Hwan, y Young Man Park. 2004. «A crane scheduling method for port container terminals.» *European Journal of Operational Research* 156(3): 752-68.
- Kirkpatrick, S., C.D. Gelatt, y M.P. Vecchi. 1983. «Optimization by simulated annealing.» *Science* 220(4598): 671-80.
- Lai, K K, y Katharine Shih. 1992. «A study of container berth allocation.» *Journal of Advanced Transportation* 26(1): 45-60.
- Lee, Der-Horng, Hui Qiu Wang, y Lixin Miao. 2008. «Quay crane scheduling with non-interference constraints in port container terminals.» *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 44(1): 124-35.
- Lee, Loo Hay, Ek Peng Chew, Kok Choon Tan, y Yongbin Han. 2006. «An optimization model for

- storage yard management in transshipment hubs.» *Container Terminals and Cargo Systems: Design, Operations Management, and Logistics Control Issues* 28(4): 539-61.
- Lee, Yusin, y Shih-Liang Chao. 2009. «A neighborhood search heuristic for pre-marshalling export containers.» *European Journal of Operational Research* 196(2): 468-75.
- Lee, Yusin, y Nai-Yun Hsu. 2007. «An optimization model for the container pre-marshalling problem.» *Computers & Operations Research* 34(11): 3295-3313.
- Li, Wenkai et al. 2009. «Discrete time model and algorithms for container yard crane scheduling.» *European Journal of Operational Research* 198(1): 165-72.
- Liang, Chengji, Youfang Huang, y Yang Yang. 2009. «A quay crane dynamic scheduling problem by hybrid evolutionary algorithm for berth allocation planning.» *Computers and Industrial Engineering* 56(3): 1021-28.
- Lin, Shih Wei, Vincent F. Yu, y Shuo Yan Chou. 2009. «Solving the truck and trailer routing problem based on a simulated annealing heuristic.» *Computers and Operations Research* 36(5): 1683-92.
- Lin, Shih-Wei, y Ching-Jung Ting. 2013. «Solving the dynamic berth allocation problem by simulated annealing.» *Engineering Optimization* 46(3): 308-27.
- Liu, C.-I., H. Jula, y P.A. Ioannou. 2002. «Design, simulation, and evaluation of automated container terminals.» *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 3(1): 12-26.
- Luo, Jiabin, y Yue Wu. 2015. «Modelling of dual-cycle strategy for container storage and vehicle scheduling problems at automated container terminals.» *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 79: 49-64.
- Meisel, Frank, y Christian Bierwirth. 2011. «A unified approach for the evaluation of quay crane scheduling models and algorithms.» *Computers and Operations Research* 38(3): 683-93.
- Metropolis, Nicholas et al. 1953. «Equation of state calculations by fast computing machines.» *The Journal of Chemical Physics* 21(6): 1087-92.
- Millán Páramo, C., O. Begambre Carrillo, y E. Millán Romero. 2014. «Propuesta y validación de un algoritmo Simulated annealing modificado para la solución de problemas de optimización.» *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería* 30(4): 264-70.
- Moccia, Luigi, Jean François Cordeau, Manlio Gaudioso, y Gilbert Laporte. 2006. «A branch-and-cut algorithm for the quay crane scheduling problem in a container terminal.» *Naval Research Logistics* 53: 45-59.
- Moorthy, Rajeeva, y Chung Piau Teo. 2007. «Berth management in container terminal: The template design problem.» *Container Terminals and Cargo Systems: Design, Operations Management, and Logistics Control Issues* 28(4): 63-86.
- Ng, W.C. 2005. «Crane scheduling in container yards with inter-crane interference.» *European Journal of Operational Research* 164(1): 64-78.
- Ng, W.C., y K.L. Mak. 2005. «Yard crane scheduling in port container terminals.» *Applied Mathematical Modelling* 29(3): 263-76.

- Nguyen, Thanh Trung, Ngoc Tuan Tran, y Tuan Anh Duong. 2009. «Informed simulated annealing for optimizing dorm room assignments.» *Proceedings - 2009 1st Asian Conference on Intelligent Information and Database Systems, ACIIDS 2009*: 265-70.
- Nishimura, Etsuko, Akio Imai, y Stratos Papadimitriou. 2001. «Berth allocation planning in the public berth system by genetic algorithms.» *European Journal of Operational Research* 131(2): 282-92.
- . 2005. «Yard trailer routing at a maritime container terminal.» *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 41(1): 53-76.
- Osman, Ibrahim Hassan. 1993. «Metastrategy simulated annealing and tabu search algorithms for the vehicle routing problem.» *Annals of Operations Research* 41(4): 421-51.
- Peterkofsky, Roy I., y Carlos F. Daganzo. 1990. «A branch and bound solution method for the crane scheduling problem.» *Transportation Research Part B: Methodological* 24(3): 159-72.
- Samarra, Marcello, Jean François Cordeau, Gilbert Laporte, y M. Flavia Monaco. 2007. «A tabu search heuristic for the quay crane scheduling problem.» *Journal of Scheduling* 10: 327-36.
- Scheuerer, Stephan. 2006. «A tabu search heuristic for the truck and trailer routing problem.» *Computers and Operations Research* 33: 894-909.
- Southworth, Frank, y Bruce E Peterson. 2000. «Intermodal and international freight network modeling.» *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 8(1-6): 147-66.
- Stahlbock, Robert, y Stefan Voß. 2008. «Operations research at container terminals: A literature update.» *OR Spectrum* 30(1): 1-52.
- Tavakkoli-Moghaddam, R. et al. 2009. «An efficient algorithm for solving a new mathematical model for a quay crane scheduling problem in container ports.» *Computers and Industrial Engineering* 56(1): 241-48.
- Thangiah, S R, I H Osman, y T Sun. 1994. «Hybrid genetic algorithm, simulated annealing and tabu search methods for vehicle routing problems with time windows.» *Computer Science Department Slippery Rock University Technical Report SRU CpScTR9427*: 1-37.
- Tierney, Kevin, Dario Pacino, y Rune Møller Jensen. 2014. «On the complexity of container stowage planning problems.» *Discrete Applied Mathematics* 169(December): 225-30.
- Villegas, Juan G. et al. 2013. «A matheuristic for the truck and trailer routing problem.» *European Journal of Operational Research* 230(2): 231-44.
- Vis, I. F A, R. De Koster, K. J. Roodbergen, y L. W P Peeters. 2001. «Determination of the number of automated guided vehicles required at a semi-automated container terminal.» *Journal of the Operational Research Society* 52(4): 409-17.
- Vis, Iris F a, y René De Koster. 2003. «Transshipment of containers at a container terminal: An overview.» *European Journal of Operational Research* 147(1): 1-16.
- Vis, Iris F. a., René (M.) B. M. de Koster, y Martin W. P. Savelsbergh. 2005. «Minimum Vehicle Fleet Size Under Time-Window Constraints at a Container Terminal.» *Transportation Science* 39(2): 249-60.
- Vis, Iris F.a. 2006. «Survey of research in the design and control of automated guided vehicle

- systems.» *European Journal of Operational Research* 170(3): 677-709.
- Voß, Stefan, Robert Stahlbock, y Dirk Steenken. 2004. «Container terminal operation and operations research - a classification and literature review.» *OR Spectrum* 26(1): 3-49.
- Wang, Jiunn-Chin. 2012. «A Multistart Simulated Annealing Algorithm for the Quadratic Assignment Problem.» *2012 Third International Conference on Innovations in Bio-Inspired Computing and Applications*: 19-23.
- Wilson, Id, Pa Roach, y Ja Ware. 2001. «Container stowage pre-planning: using search to generate solutions, a case study.» *Knowledge-Based Systems* 14(3-4): 137-45.
- Yan, Wei, Youfang Huang, Daofang Chang, y Junliang He. 2011. «An investigation into knowledge-based yard crane scheduling for container terminals.» *Advanced Engineering Informatics* 25(3): 462-71.
- Zhang, Chuqian et al. 2003. «Storage space allocation in container terminals.» *Transportation Research Part B: Methodological* 37(10): 883-903.
- Zhen, Lu, Ek Peng Chew, y Loo Hay Lee. 2011. «An Integrated Model for Berth Template and Yard Template Planning in Transshipment Hubs.» *Transportation Science* 43(45(5)): 483-504.
- Zhu, Minghua, Xiumin Fan, Huanchong Cheng, y Qichang He. 2010. «Modeling and simulation of automated container terminal operation.» *Journal of Computers* 5(6): 951-57.

ANEXO I. BATERÍA DE PROBLEMAS

A continuación se presenta la batería de problemas resuelta para demostrar la validez del algoritmo. Los datos de entrada de todos los escenarios son:

- Las ventanas temporales de los buques y los trenes.
- Los tiempos de descarga y de carga de cada grúa.

La configuración de los 16 escenarios se basa en 4 modelos de entrada de buques y trenes resueltos cada uno en 4 escenarios posibles, dependiendo de la disponibilidad de grúas.

Escenarios 1 a 4

Identificador transporte	Contenedores a descargar	Contenedores a cargar	Inicio ventana temporal	Fin ventana temporal
V001	Ab,Bb,Cb	Ib,Kb,Lb	10	40
V002	Db,Eb,Fb	Jb,Gb,Hb	20	50
T001	Gb,Hb	Eb,Fb	5	35
T002	Ib,Jb	Ab,Bb	15	45
T003	Kb,Lb	Cb,Db	25	55

Tabla 24. Entradas de buques y trenes para los escenarios 1 a 4

Escenario 1

Identificador grúa	Tipo de grúa	Tiempo de descarga	Tiempo de carga
C001	Barco	5	5
C001	Tren	5	5

Tabla 25. Grúas disponibles en el escenario 1

Escenario 2

Identificador grúa	Tipo de grúa	Tiempo de descarga	Tiempo de carga
C001	Barco	5	5
C002	Barco	5	5
C001	Tren	5	5
C002	Tren	5	5

Tabla 26. Grúas disponibles en el escenario 2

Escenario 3

Identificador grúa	Tipo de grúa	Tiempo de descarga	Tiempo de carga
C001	Barco	5	5
C002	Barco	5	5
C003	Barco	5	5
C001	Tren	5	5
C002	Tren	5	5
C003	Tren	5	5

Tabla 27. Grúas disponibles en el escenario 3

Escenario 4

Identificador grúa	Tipo de grúa	Tiempo de descarga	Tiempo de carga
C001	Barco	5	5
C002	Barco	5	5
C003	Barco	5	5
C004	Barco	5	5
C001	Tren	5	5
C002	Tren	5	5
C003	Tren	5	5
C004	Tren	5	5

Tabla 28. Grúas disponibles en el escenario 4

Escenarios 5 a 8

Identificador transporte	Contenedores a descargar	Contenedores a cargar	Inicio ventana temporal	Fin ventana temporal
V001	Ab,Bb,Cb,Db	Ib,Kb,Lb,Ob	10	40
V002	Eb,Fb,Gb,Hb	Jb,Mb,Nb,Pb	20	50
T001	Ob,Pb	Eb,Fb	5	35
T002	Ib,Jb	Ab,Bb	15	45
T003	Kb,Lb	Cb,Db	25	55
T004	Mb,Nb	Gb,Hb	30	65

Tabla 29. Entradas de buques y trenes en los escenarios 5 a 8

Escenario 5

Identificador grúa	Tipo de grúa	Tiempo de descarga	Tiempo de carga
C001	Barco	5	5
C001	Tren	5	5

Tabla 30. Grúas disponibles en el escenario 5

Escenario 6

Identificador grúa	Tipo de grúa	Tiempo de descarga	Tiempo de carga
C001	Barco	5	5
C002	Barco	5	5
C001	Tren	5	5
C002	Tren	5	5

Tabla 31. Grúas disponibles en el escenario 6

Escenario 7

Identificador grúa	Tipo de grúa	Tiempo de descarga	Tiempo de carga
C001	Barco	5	5
C002	Barco	5	5
C003	Barco	5	5
C001	Tren	5	5
C002	Tren	5	5
C003	Tren	5	5

Tabla 32. Grúas disponibles en el escenario 7

Escenario 8

Identificador grúa	Tipo de grúa	Tiempo de descarga	Tiempo de carga
C001	Barco	5	5
C002	Barco	5	5
C003	Barco	5	5
C004	Barco	5	5
C001	Tren	5	5
C002	Tren	5	5
C003	Tren	5	5
C004	Tren	5	5

Tabla 33. Grúas disponibles en el escenario 8

Escenarios 9 a 12

Identificador transporte	Contenedores a descargar	Contenedores a cargar	Inicio ventana temporal	Fin ventana temporal
V001	Ab,Bb,Cb,Db	ab,bb,cb,db	10	40
V002	Eb,Fb,Gb,Hb	eb,fb,gb,hb	20	50
V003	Ib,Jb,Kb,Lb	ib,jb,kb,lb	15	35
V004	Mb,Nb,Ob,Pb	mb,nb,ob,pb	30	70
V005	Qb,Rb,Sb,Tb	qb,rb,sb,tb	50	90
T001	ab,bb	Ab,Bb	5	35
T002	cb,db	Cb,Db	15	45
T003	eb,fb	Eb,Fb	25	55
T004	gb,hb	Gb,Hb	30	65
T005	ib,jb	Ib,Jb	10	35
T006	kb,lb	Kb,Lb	15	60
T007	mb,nb	Mb,Nb	5	20
T000	ob,pb	Ob,Pb	15	45
T009	qb,rb	Qb,Rb	25	55
T0010	sb,tb	Sb,Tb	30	65

Tabla 34. Entradas de buques y trenes en los escenarios 9 a 12

Escenario 9

Identificador grúa	Tipo de grúa	Tiempo de descarga	Tiempo de carga
C001	V	5	5
C001	T	5	5

Tabla 35. Grúas disponibles en el escenario 9

Escenario 10

Identificador grúa	Tipo de grúa	Tiempo de descarga	Tiempo de carga
C001	V	5	5
C002	V	5	5
C001	T	5	5
C002	T	5	5

Tabla 36. Grúas disponibles en el escenario 10

Escenario 11

Identificador grúa	Tipo de grúa	Tiempo de descarga	Tiempo de carga
C001	Barco	5	5
C002	Barco	5	5
C003	Barco	5	5
C001	Tren	5	5
C002	Tren	5	5
C003	Tren	5	5

Tabla 37. Grúas disponibles en el escenario 11

Escenario 12

Identificador grúa	Tipo de grúa	Tiempo de descarga	Tiempo de carga
C001	Barco	5	5
C002	Barco	5	5
C003	Barco	5	5
C004	Barco	5	5
C001	Tren	5	5
C002	Tren	5	5
C003	Tren	5	5
C004	Tren	5	5

Tabla 38. Grúas disponibles en el escenario 12

Escenarios 13 a 16

Identificador transporte	Contenedores a descargar	Contenedores a cargar	Inicio ventana temporal	Fin ventana temporal
V001	Aa,Ba,Ca,Da	aa,ba,ca,da	10	40
V002	Ea,Fa,Ga,Ha	ea,fa,ga,ha	20	75
V003	Ia,Ja,Ka,La	ia,ja,ka,la	25	45
V004	Ma,Na,Oa,Pa	ma,na,oa,pa	20	50
V005	Qa,Ra,Sa,Ta	qa,ra,sa,ta	50	85
V006	Ua,Va,Wa,Xa	ua,va,wa,xa	40	90
V007	Ya,Za,Ab,Bb	ya,za,ab,bb	45	100
V008	Cb,Db,Eb,Fb	cb,db,eb,fb	35	95
V009	Gb,Hb,Ib,Jb	gb,hb,ib,jb	30	60
V010	Kb,Lb,Mb,Nb	kb,lb,mb,nb	30	55
T001	aa,ba	Aa,Ba	5	35
T002	ca,da	Ca,Da	15	45
T003	ea,fa	Ea,Fa	25	55
T004	ga,ha	Ga,Ha	35	65
T005	ia,ja	Ia,Ja	30	80
T006	ka,la	Ka,La	25	45
T007	ma,na	Ma,Na	20	55
T008	oa,pa	Oa,Pa	35	70
T009	qa,ra	Qa,Ra	60	110
T010	sa,ta	Sa,Ta	55	90
T011	ua,va	Ua,Va	45	75
T012	wa,xa	Wa,Xa	20	55
T013	ya,za	Ya,Za	35	60
T014	ab,bb	Ab,Bb	10	45
T015	cb,db	Cb,Db	55	80
T016	eb,fb	Eb,Fb	45	95
T017	gb,hb	Gb,Hb	65	105
T018	ib,jb	Ib,Jb	70	115
T019	kb,lb	Kb,Lb	25	80
T020	mb,nb	Mb,Nb	50	100

Tabla 39. Entrada de buques y trenes en los escenarios 13 a 16

Escenario 13

Identificador grúa	Tipo de grúa	Tiempo de descarga	Tiempo de carga
C001	Barco	5	5
C001	Tren	5	5

Tabla 40. Grúas disponibles en el escenario 13

Escenario 14

Identificador grúa	Tipo de grúa	Tiempo de descarga	Tiempo de carga
C001	Barco	5	5
C002	Barco	5	5
C001	Tren	5	5
C002	Tren	5	5

Tabla 41. Grúas disponibles en el escenario 14

Escenario 15

Identificador grúa	Tipo de grúa	Tiempo de descarga	Tiempo de carga
C001	Barco	5	5
C002	Barco	5	5
C003	Barco	5	5
C001	Tren	5	5
C002	Tren	5	5
C003	Tren	5	5

Tabla 42. Grúas disponibles en el escenario 15

Escenario 16

Identificador grúa	Tipo de grúa	Tiempo de descarga	Tiempo de carga
C001	Barco	5	5
C002	Barco	5	5
C003	Barco	5	5
C004	Barco	5	5
C001	Tren	5	5
C002	Tren	5	5
C003	Tren	5	5
C004	Tren	5	5

Tabla 43. Grúas disponibles en el escenario 16

ANEXO II. RESULTADOS DE LA BATERÍA DE PROBLEMAS

En el presente anexo se muestran los resultados de la batería de problemas empleada para validar el algoritmo.

Problema 1

BUQUES	Identificador	Inicio Ventana Temporal	Fin Ventana Temporal	Instante de llegada	Instante de salida
	B001	10	40	10	70
	B002	20	50	20	50

Tabla 44. Solución buques. Escenario 1

TRENES	Identificador	Inicio Ventana Temporal	Fin Ventana Temporal	Instante de llegada	Instante de salida
	T001	5	35	5	45
	T002	15	45	15	35
	T003	25	55	45	65

Tabla 45. Solución trenes. Escenario 1

Grúa de buque 1	Tare a 1	Tare a 2	Tare a 3	Tare a 4	Tare a 5	Tare a 6	Tare a 7	Tare a 8	Tare a 9	Tare a 10	Tare a 11	Tare a 12
Tipo de operación	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	1	1
Contenedor	A	B	D	E	F	J	G	H	C	I	K	L
Instante	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65

Tabla 46. Configuración grúa de buque 1. Escenario 1

Grúa de tren 1	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4	Tarea 5	Tarea 6	Tarea 7	Tarea 8	Tarea 9	Tarea 10	Tarea 11	Tarea 12
Tipo de operación	-1	-1	-1	1	-1	1	1	1	-1	-1	1	1
Contenedor	G	H	I	A	J	B	F	E	L	K	D	C
Instante	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60

Tabla 47. Configuración grúa de tren 1. Escenario 1

Valor de la solución	Tiempo de computación (s)
265	49,47

Tabla 48. Solución del problema 1

Problema 2

BUQUES	Identificador	Inicio Ventana Temporal	Fin Ventana Temporal	Instante de llegada	Instante de salida
	B001	10	40	10	35
	B002	20	50	20	45

Tabla 49. Solución buques. Escenario 2

TRENES	Identificador	Inicio Ventana Temporal	Fin Ventana Temporal	Instante de llegada	Instante de salida
	T001	5	35	5	40
	T002	15	45	15	25
	T003	25	55	25	35

Tabla 50. Solución trenes. Escenario 2

Grúa de buque 1	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4	Tarea 5	Tarea 6	Tarea 7
Tipo de operación	-1	-1	-1	-1	1	1	1
Contenedor	Ab	Cb	Db	Eb	Kb	Jb	Hb
Instante	10	15	20	25	30	35	40

Tabla 51. Configuración grúa de buque 1. Escenario 2

Grúa de buque 2	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4	Tarea 5
Tipo de operación	-1	1	-1	1	1
Contenedor	Bb	lb	Fb	Lb	Gb
Instante	10	20	25	30	35

Tabla 52. Configuración grúa de buque 2. Escenario 2

Grúa de tren 1	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4	Tarea 5	Tarea 6
Tipo de operación	-1	-1	1	-1	1	1
Contenedor	Gb	lb	Ab	Kb	Cb	Eb
Instante	5	15	20	25	30	35

Tabla 53. Configuración grúa de tren 1. Escenario 2

Grúa de tren 2	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4	Tarea 5	Tarea 6
Tipo de operación	-1	-1	1	-1	1	1
Contenedor	Hb	Jb	Bb	Lb	Db	Fb
Instante	5	15	20	25	30	35

Tabla 54. Configuración grúa de tren 2. Escenario 2

Valor de la solución	Tiempo de computación (s)
180	65,93

Tabla 55. Solución del problema 2

Problema 3

BUQUES	Identificador	Inicio Ventana Temporal	Fin Ventana Temporal	Instante de llegada	Instante de salida
	B001	10	40	10	35
	B002	20	50	20	30

Tabla 56. Solución buques. Escenario 3

TRENES	Identificador	Inicio Ventana Temporal	Fin Ventana Temporal	Instante de llegada	Instante de salida
	T001	5	35	5	35
	T002	15	45	15	25
	T003	25	55	25	35

Tabla 57. Solución trenes. Escenario 3

Grúa de buque 1	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4
Tipo de operación	-1	-1	1	1
Contenedor	Ab	Db	Jb	lb
Instante	10	20	25	30

Tabla 58. Configuración grúa de buque 1. Escenario 3

Grúa de buque 2	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4
Tipo de operación	-1	-1	1	1
Contenedor	Bb	Eb	Gb	Kb
Instante	10	20	25	30

Tabla 59. Configuración grúa de buque 2. Escenario 3

Grúa de buque 3	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4
Tipo de operación	-1	-1	1	1
Contenedor	Cb	Fb	Hb	Lb
Instante	10	20	25	30

Tabla 60. Configuración grúa de buque 3. Escenario 3

Grúa de tren 1	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4	Tarea 5
Tipo de operación	-1	-1	1	-1	1
Contenedor	Gb	lb	Ab	Kb	Fb
Instante	5	15	20	25	30

Tabla 61. Configuración grúa de tren 1. Escenario 3

Grúa de tren 2	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4
Tipo de operación	-1	-1	1	1
Contenedor	Hb	Jb	Eb	Cb
Instante	5	15	25	30

Tabla 62. Configuración grúa de tren 2. Escenario 3

Grúa de tren 3	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3
Tipo de operación	1	-1	1
Contenedor	Bb	Lb	Db
Instante	15	25	30

Tabla 63. Configuración grúa de tren 3. Escenario 3

Valor de la solución	Tiempo de computación (s)
160	92,52

Tabla 64. Solución del problema 3

Problema 4

BUQUES	Identificador	Inicio Ventana Temporal	Fin Ventana Temporal	Instante de llegada	Instante de salida
	B001	10	40	10	35
	B002	20	50	20	30

Tabla 65. Solución buques. Escenario 4

TRENES	Identificador	Inicio Ventana Temporal	Fin Ventana Temporal	Instante de llegada	Instante de salida
	T001	5	35	5	30
	T002	15	45	15	20
	T003	25	55	25	35

Tabla 66. Solución trenes. Escenario 4

Grúa de buque 1	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4
Tipo de operación	-1	1	1	1
Contenedor	Ab	lb	Jb	Kb
Instante	10	20	25	30

Tabla 67. Configuración grúa de buque 1. Escenario 4

Grúa de buque 2	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4
Tipo de operación	-1	-1	1	1
Contenedor	Bb	Db	Gb	Lb
Instante	10	20	25	30

Tabla 68. Configuración grúa de buque 2. Escenario 4

Grúa de buque 3	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3
Tipo de operación	-1	-1	1
Contenedor	Cb	Eb	Hb
Instante	10	20	25

Tabla 69. Configuración grúa de buque 3. Escenario 4

Grúa de buque 4	Tarea 1
Tipo de operación	-1
Contenedor	Fb
Instante	20

Tabla 70. Configuración grúa de buque 4. Escenario 4

Grúa de tren 1	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4
Tipo de operación	-1	-1	-1	1
Contenedor	Gb	Jb	Lb	Db
Instante	5	15	25	30

Tabla 71. Configuración grúa de tren 1. Escenario 4

Grúa de tren 2	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4
Tipo de operación	-1	-1	1	1
Contenedor	Hb	Ib	Eb	Cb
Instante	5	15	25	30

Tabla 72. Configuración grúa de tren 2. Escenario 4

Grúa de tren 3	Tarea 1	Tarea 2
Tipo de operación	1	-1
Contenedor	Bb	Kb
Instante	15	25

Tabla 73. Configuración grúa de tren 3. Escenario 4

Grúa de tren 4	Tarea 1	Tarea 2
Tipo de operación	1	1
Contenedor	Ab	Fb
Instante	15	25

Tabla 74. Configuración grúa de tren 4. Escenario 4

Valor de la solución	Tiempo de computación (s)
150	124,79

Tabla 75. Solución del problema 4

Problema 5

BUQUES	Identificador	Inicio Ventana Temporal	Fin Ventana Temporal	Instante de llegada	Instante de salida
	B001	10	40	10	60
	B002	20	50	20	90

Tabla 76. Solución buques. Escenario 5

TRENES	Identificador	Inicio Ventana Temporal	Fin Ventana Temporal	Instante de llegada	Instante de salida
	T001	5	35	5	65
	T002	15	45	15	35
	T003	25	55	30	55
	T004	30	65	60	85

Tabla 77. Solución trenes. Escenario 5

Grúa de buque 1	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4	Tarea 5	Tarea 6	Tarea 7	Tarea 8
Tipo de operación	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1
Contenedor	Ab	Bb	Cb	Db	Eb	lb	Kb	Lb
Instante	10	15	20	25	30	35	40	45
Grúa de buque 1	Tarea 9	Tarea 10	Tarea 11	Tarea 12	Tarea 13	Tarea 14	Tarea 15	Tarea 16
Tipo de operación	-1	1	-1	-1	1	1	1	1
Contenedor	Fb	Ob	Gb	Hb	Jb	Mb	Nb	Pb
Instante	50	55	60	65	70	75	80	85

Tabla 78. Configuración grúa de buque 1. Escenario 5

Grúa de tren 1	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4	Tarea 5	Tarea 6	Tarea 7	Tarea 8
Tipo de operación	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1

Contenedor	Pb	Ob	Jb	lb	Ab	Bb	Kb	Lb
Instante	5	10	15	20	25	30	35	40
Grúa de tren 1	Tarea 9	Tarea 10	Tarea 11	Tarea 12	Tarea 13	Tarea 14	Tarea 15	Tarea 16
Tipo de operación	1	1	1	1	-1	-1	1	1
Contenedor	Cb	Db	Fb	Eb	Mb	Nb	Gb	Hb
Instante	45	50	55	60	65	70	75	80

Tabla 79. Configuración grúa de tren 1. Escenario 5

Valor de la solución	Tiempo de computación (s)
390	39,50

Tabla 80. Solución del problema 5

Problema 6

BUQUES	Identificador	Inicio Ventana Temporal	Fin Ventana Temporal	Instante de llegada	Instante de salida
	B001	10	40	10	45
	B002	20	50	20	50

Tabla 81. Solución buques. Escenario 6

TRENES	Identificador	Inicio Ventana Temporal	Fin Ventana Temporal	Instante de llegada	Instante de salida
	T001	5	35	10	30
	T002	15	45	15	25
	T003	25	55	25	45
	T004	30	65	35	50

Tabla 82. Solución trenes. Escenario 6

Grúa de buque 1	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4	Tarea 5	Tarea 6	Tarea 7	Tarea 8	Tarea 9
Tipo de operación	-1	-1	-1	1	-1	1	1	1	1
Contenedor	Ab	Cb	Eb	Ib	Hb	Kb	Ob	Nb	Pb
Instante	10	15	20	25	30	35	40	45	50

Tabla 83. Configuración grúa de buque 1. Escenario 6

Grúa de buque 2	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4	Tarea 5	Tarea 6	Tarea 7	Tarea 8
Tipo de operación	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1
Contenedor	Bb	Db	Fb	Gb	Jb	Lb	Mb	Pb
Instante	10	15	20	25	30	35	40	45

Tabla 84. Configuración grúa de buque 2. Escenario 6

Grúa de tren 1	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4	Tarea 5	Tarea 6	Tarea 7	Tarea 8
Tipo de operación	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1
Contenedor	Pb	lb	Bb	Fb	Lb	Mb	Db	Gb
Instante	10	15	20	25	30	35	40	45

Tabla 85. Configuración grúa de tren 1. Escenario 6

Grúa de tren 2	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4	Tarea 5	Tarea 6	Tarea 7	Tarea 8
Tipo de operación	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1
Contenedor	Ob	Jb	Ab	Eb	Kb	Nb	Cb	Hb
Instante	10	15	20	25	30	35	40	45

Tabla 86. Configuración grúa de tren 2. Escenario 6

Valor de la solución	Tiempo de computación (s)
245	48,67

Tabla 87. Solución del problema 5

Problema 7

BUQUES	Identificador	Inicio Ventana Temporal	Fin Ventana Temporal	Instante de llegada	Instante de salida
	B001	10	40	10	35
	B002	20	50	20	45

Tabla 88. Solución buques. Escenario 7

TRENES	Identificador	Inicio Ventana Temporal	Fin Ventana Temporal	Instante de llegada	Instante de salida
	T001	5	35	10	35
	T002	15	45	15	25
	T003	25	55	25	35
	T004	30	65	30	45

Tabla 89. Solución trenes. Escenario 7

Grúa de buque 1	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4	Tarea 5	Tarea 6
Tipo de operación	-1	-1	1	-1	1	1
Contenedor	Ab	Db	lb	Gb	Kb	Mb
Instante	10	15	20	25	30	40

Tabla 90. Configuración grúa de buque 1. Escenario 7

Grúa de buque 2	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4	Tarea 5
Tipo de operación	-1	-1	-1	1	1
Contenedor	Bb	Eb	Hb	Lb	Nb
Instante	10	20	25	30	40

Tabla 91. Configuración grúa de buque 2. Escenario 7

Grúa de buque 3	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4	Tarea 5
Tipo de operación	-1	-1	1	1	1
Contenedor	Cb	Fb	Jb	Ob	Pb
Instante	10	20	25	30	40

Tabla 92. Configuración grúa de buque 3. Escenario 7

Grúa de tren 1	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4	Tarea 5
Tipo de operación	-1	-1	1	-1	1
Contenedor	Ob	lb	Ab	Kb	Db
Instante	5	15	20	25	30

Tabla 93. Configuración grúa de tren 1. Escenario 7

Grúa de tren 2	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4	Tarea 5
Tipo de operación	-1	-1	-1	1	-1
Contenedor	Pb	Jb	Lb	Cb	Nb
Instante	5	15	25	30	35

Tabla 94. Configuración grúa de tren 2. Escenario 7

Grúa de tren 3	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4	Tarea 5
Tipo de operación	1	1	1	1	1
Contenedor	Bb	Eb	Fb	Gb	Hb
Instante	15	25	30	35	35

Tabla 95. Configuración grúa de tren 3. Escenario 7

Valor de la solución	Tiempo de computación (s)
----------------------	---------------------------

220	69,84
-----	-------

Tabla 96. Solución del problema 7

Problema 8

BUQUES	Identificador	Inicio Ventana Temporal	Fin Ventana Temporal	Instante de llegada	Instante de salida
	B001	10	40	10	35
	B002	20	50	25	40

Tabla 97. Solución buques. Escenario 8

TRENES	Identificador	Inicio Ventana Temporal	Fin Ventana Temporal	Instante de llegada	Instante de salida
	T001	5	35	15	35
	T002	15	45	15	20
	T003	25	55	25	30
	T004	30	65	30	40

Tabla 98. Solución trenes. Escenario 8

Grúa de buque 1	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4	Tarea 5
Tipo de operación	-1	1	-1	1	1
Contenedor	Ab	lb	Eb	Jb	Mb
Instante	10	20	25	30	35

Tabla 99. Configuración grúa de buque 1. Escenario 8

Grúa de buque 2	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4
Tipo de operación	-1	-1	1	1
Contenedor	Bb	Fb	Kb	Nb
Instante	10	25	30	35

Tabla 100. Configuración grúa de buque 2. Escenario 8

Grúa de buque 3	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4
Tipo de operación	-1	-1	1	1
Contenedor	Cb	Gb	Lb	Pb
Instante	10	25	30	35

Tabla 101. Configuración grúa de buque 3. Escenario 8

Grúa de buque 4	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3
Tipo de operación	-1	-1	1
Contenedor	Db	Hb	Ob
Instante	10	25	30

Tabla 102. Configuración grúa de buque 4. Escenario

Grúa de tren 1	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4	Tarea 5
Tipo de operación	-1	-1	-1	-1	1
Contenedor	lb	Ob	Kb	Nb	Gb
Instante	15	20	25	30	35

Tabla 103. Configuración grúa de tren 1. Escenario 8

Grúa de tren 2	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4	Tarea 5
Tipo de operación	-1	-1	-1	1	1
Contenedor	Jb	Pb	Lb	Fb	Hb
Instante	15	20	25	30	35

Tabla 104. Configuración grúa de tren 2. Escenario 8

Grúa de tren 3	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4
----------------	---------	---------	---------	---------

Tipo de operación	1	1	-1	1
Contenedor	Bb	Cb	Mb	Hb
Instante	15	25	30	35

Tabla 105. Configuración grúa de tren 3. Escenario 8

Grúa de tren 4	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4
Tipo de operación	1	1	1	1
Contenedor	Ab	Db	Eb	Gb
Instante	15	25	30	35

Tabla 106. Configuración grúa de tren 4. Escenario 8

Valor de la solución	Tiempo de computación (s)
200	87,47

Tabla 107. Solución del problema 8

Problema 9

	Identificador	Inicio Ventana Temporal	Fin Ventana Temporal	Instante de llegada	Instante de salida
BUQUES	B001	10	40	10	135
	B002	20	50	30	130
	B003	15	35	20	175
	B004	30	70	65	180
	B005	50	90	60	210

Tabla 108. Solución buques. Escenario 9

	Identificador	Inicio Ventana Temporal	Fin Ventana Temporal	Instante de llegada	Instante de salida
TRENES	T001	5	35	5	70
	T002	15	45	35	115
	T003	25	55	35	95
	T004	30	65	60	165
	T005	10	35	25	55
	T006	15	60	45	170
	T007	5	20	5	105
	T008	15	45	40	200
	T009	25	55	40	185
	T0010	30	65	65	205

Tabla 109. Solución trenes. Escenario 9

Grúa de buque 1	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4	Tarea 5	Tarea 6	Tarea 7	Tarea 8	Tarea 9	Tarea 10
Tipo de operación	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1
Contenedor	Ab	Bb	lb	Cb	Jb	Eb	Db	ab	bb	Fb
Instante	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55

Grúa de buque 1	Tarea 11	Tarea 12	Tarea 13	Tarea 14	Tarea 15	Tarea 16	Tarea 17	Tarea 18	Tarea 19	Tarea 20
Tipo de operación	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	1
Contenedor	Kb	Gb	Mb	Hb	Nb	Lb	ib	eb	Ob	cb
Instante	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105
Grúa de buque 1	Tarea 21	Tarea 22	Tarea 23	Tarea 24	Tarea 25	Tarea 26	Tarea 27	Tarea 28	Tarea 29	Tarea 30
Tipo de operación	-1	1	1	1	1	1	1	-1	1	1
Contenedor	Pb	fb	gb	hb	db	mb	nb	Qb	ob	jb
Instante	110	115	120	125	130	135	140	145	150	155
Grúa de buque 1	Tarea 31	Tarea 32	Tarea 33	Tarea 34	Tarea 35	Tarea 36	Tarea 37	Tarea 38	Tarea 39	Tarea 40
Tipo de operación	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1
Contenedor	kb	Rb	lb	pb	Sb	Tb	qb	rb	sb	tb
Instante	160	165	170	175	180	185	190	195	200	205

Tabla 110. Configuración grúa de buque 1. Escenario 9

Grúa de tren 1	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4	Tarea 5	Tarea 6	Tarea 7	Tarea 8	Tarea 9	Tarea 10
Tipo de operación	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	1
Contenedor	ab	mb	nb	bb	ib	Bb	cb	jb	Jb	lb
Instante	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Grúa de tren 1	Tarea 11	Tarea 12	Tarea 13	Tarea 14	Tarea 15	Tarea 16	Tarea 17	Tarea 18	Tarea 19	Tarea 20
Tipo de operación	-1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	1
Contenedor	db	eb	Ab	Db	fb	Mb	Eb	Fb	ob	Nb
Instante	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
Grúa de tren 1	Tarea 21	Tarea 22	Tarea 23	Tarea 24	Tarea 25	Tarea 26	Tarea 27	Tarea 28	Tarea 29	Tarea 30

Tipo de operación	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1
Contenedor	sb	Cb	gb	hb	rb	Hb	qb	tb	kb	lb
Instante	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150
Grúa de tren 1	Tarea 31	Tarea 32	Tarea 33	Tarea 34	Tarea 35	Tarea 36	Tarea 37	Tarea 38	Tarea 39	Tarea 40
Tipo de operación	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1
Contenedor	Lb	Gb	Kb	pb	Rb	Qb	Pb	Tb	Ob	Sb
Instante	155	160	165	170	175	180	185	190	195	200

Tabla 111. Configuración grúa de tren 1. Escenario 9

Valor de la solución	Tiempo de computación (s)
2195	319,25

Tabla 112. Solución del problema 9

Problema 10

	Identificador	Inicio Ventana Temporal	Fin Ventana Temporal	Instante de llegada	Instante de salida
BUQUES	B001	10	40	10	40
	B002	20	50	50	90
	B003	15	35	25	55
	B004	30	70	35	90
	B005	50	90	90	110

Tabla 113. Solución buques. Escenario 10

	Identificador	Inicio Ventana Temporal	Fin Ventana Temporal	Instante de llegada	Instante de salida
TRENES	T001	5	35	5	25
	T002	15	45	25	40
	T003	25	55	50	70
	T004	30	65	50	95
	T005	10	35	10	40
	T006	15	60	30	50
	T007	5	20	10	60
	T008	15	45	45	85
	T009	25	55	50	100
	T0010	30	65	65	105

Tabla 114. Solución trenes. Escenario 10

Grúa de buque 1	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4	Tarea 5	Tarea 6	Tarea 7	Tarea 8	Tarea 9	Tarea 10
Tipo de operación	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1
Contenedor	Ab	Cb	ab	lb	cb	Lb	ib	Nb	kb	Eb
Instante	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55

Grúa de buque 1	Tarea 11	Tarea 12	Tarea 13	Tarea 14	Tarea 15	Tarea 16	Tarea 17	Tarea 18	Tarea 19	Tarea 20
Tipo de operación	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	1	1
Contenedor	Gb	eb	fb	mb	gb	hb	Qb	Sb	qb	sb
Instante	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105

Tabla 115. Configuración grúa de buque 1. Escenario 10

Grúa de buque 2	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4	Tarea 5	Tarea 6	Tarea 7	Tarea 8	Tarea 9	Tarea 10
Tipo de operación	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1
Contenedor	Bb	Db	bb	Jb	Kb	db	Mb	jb	lb	Fb
Instante	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55

Grúa de tren 2	Tarea 11	Tarea 12	Tarea 13	Tarea 14	Tarea 15	Tarea 16	Tarea 17	Tarea 18	Tarea 19	Tarea 20
Tipo de operación	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1	1
Contenedor	Hb	Ob	Pb	nb	ob	pb	Rb	Tb	rb	tb
Instante	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105

Tabla 116. Configuración grúa de buque 2. Escenario 10

Grúa de tren 1	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4	Tarea 5	Tarea 6	Tarea 7	Tarea 8	Tarea 9	Tarea 10
Tipo de operación	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	1	1
Contenedor	bb	nb	Bb	ib	db	lb	Cb	kb	Lb	Nb
Instante	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50

Grúa de tren 1	Tarea 11	Tarea 12	Tarea 13	Tarea 14	Tarea 15	Tarea 16	Tarea 17	Tarea 18	Tarea 19	Tarea 20
Tipo de operación	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1
Contenedor	Mb	fb	Eb	hb	tb	Pb	qb	Gb	Qb	Tb

Instante	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
-----------------	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----

Tabla 117. Configuración grúa de tren 1. Escenario 10

Grúa de tren 2	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4	Tarea 5	Tarea 6	Tarea 7	Tarea 8	Tarea 9	Tarea 10
Tipo de operación	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1
Contenedor	ab	mb	jb	Ab	cb	Db	Jb	lb	Kb	ob
Instante	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Grúa de tren 2	Tarea 11	Tarea 12	Tarea 13	Tarea 14	Tarea 15	Tarea 16	Tarea 17	Tarea 18	Tarea 19	Tarea 20
Tipo de operación	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1
Contenedor	gb	eb	Fb	sb	pb	Ob	rb	Hb	Rb	Sb
Instante	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100

Tabla 118. Configuración grúa de tren 2. Escenario 10

Valor de la solución	Tiempo de computación (s)
1055	274,53

Tabla 119. Solución del problema 10

Problema 11

	Identificador	Inicio Ventana Temporal	Fin Ventana Temporal	Instante de llegada	Instante de salida
BUQUES	B001	10	40	10	30
	B002	20	50	30	55
	B003	15	35	15	40
	B004	30	70	45	70
	B005	50	90	55	80

Tabla 120. Solución buques. Escenario 11

	Identificador	Inicio Ventana Temporal	Fin Ventana Temporal	Instante de llegada	Instante de salida
TRENES	T001	5	35	5	20
	T002	15	45	20	30
	T003	25	55	30	45
	T004	30	65	40	55
	T005	10	35	10	35
	T006	15	60	15	35
	T007	5	20	5	55
	T008	15	45	40	65
	T009	25	55	55	70
	T0010	30	65	65	80

Tabla 121. Solución trenes. Escenario 11

Grúa de buque 1	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4	Tarea 5	Tarea 6	Tarea 7	Tarea 8	Tarea 9	Tarea 10
Tipo de operación	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1	-1
Contenedor	Ab	Db	lb	cb	ib	kb	Gb	Mb	gb	Pb

Instante	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
Grúa de buque 1	Tarea 11	Tarea 12	Tarea 13	Tarea 14	Tarea 15	Tarea 16	Tarea 17	Tarea 18	Tarea 19	Tarea 20
Tipo de operación	-1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	1
Contenedor	Rb	Tb	qb	sb	gb	Sb	mb	ob	qb	sb
Instante	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105

Tabla 122. Configuración grúa de buque 1. Escenario 11

Grúa de buque 2	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4	Tarea 5	Tarea 6	Tarea 7	Tarea 8	Tarea 9	Tarea 10
Tipo de operación	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1
Contenedor	Bb	ab	Jb	db	Eb	Fb	Hb	fb	hb	mb
Instante	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
Grúa de buque 2	Tarea 11	Tarea 12	Tarea 13	Tarea 14	Tarea 15	Tarea 16	Tarea 17	Tarea 18	Tarea 19	Tarea 20
Tipo de operación	-1	1	1	1	1	-1	1	1	1	1
Contenedor	Sb	ob	rb	tb	hb	Tb	nb	pb	rb	tb
Instante	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105

Tabla 123. Configuración grúa de buque 2. Escenario 11

Grúa de buque 3	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4	Tarea 5	Tarea 6	Tarea 7
Tipo de operación	-1	1	-1	-1	1	1	1
Contenedor	Cb	bb	Kb	Lb	jb	lb	eb
Instante	10	15	20	25	30	35	40
Grúa de buque 3	Tarea 8	Tarea 9	Tarea 10	Tarea 11	Tarea 12	Tarea 13	Tarea 14
Tipo de operación	-1	-1	-1	1	1	1	1
Contenedor	Nb	Ob	Qb	nb	pb	Rb	Tb

Instante	45	50	55	60	65	80	90
-----------------	----	----	----	----	----	----	----

Tabla 124. Configuración grúa de buque 3. Escenario 11

Grúa de tren 1	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4	Tarea 5	Tarea 6	Tarea 7
Tipo de operación	-1	-1	-1	-1	1	1	-1
Contenedor	ab	jb	kb	lb	Db	lb	fb
Instante	5	10	15	20	25	30	35
Grúa de tren 1	Tarea 8	Tarea 9	Tarea 10	Tarea 11	Tarea 12	Tarea 13	Tarea 14
Tipo de operación	-1	-1	1	1	-1	-1	1
Contenedor	pb	gb	Mb	Pb	qb	sb	Sb
Instante	40	45	50	60	65	70	75

Tabla 125. Configuración grúa de tren 1. Escenario 11

Grúa de tren 2	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4	Tarea 5	Tarea 6	Tarea 7
Tipo de operación	-1	-1	1	-1	1	1	-1
Contenedor	bb	ib	Bb	cb	Cb	Lb	eb
Instante	5	10	15	20	25	30	35
Grúa de tren 2	Tarea 8	Tarea 9	Tarea 10	Tarea 11	Tarea 12	Tarea 13	Tarea 14
Tipo de operación	-1	-1	1	1	1	-1	
Contenedor	ob	hb	Hb	Ob	Qb	tb	
Instante	40	45	50	60	65	70	

Tabla 126. Configuración grúa de tren 2. Escenario 11

Grúa de tren 3	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4	Tarea 5	Tarea 6	Tarea 7
----------------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------

Tipo de operación	-1	-1	1	-1	1	1	1
Contenedor	mb	nb	Ab	db	Jb	Kb	Eb
Instante	5	10	15	20	25	30	35
Grúa de tren 3	Tarea 8	Tarea 9	Tarea 10	Tarea 11	Tarea 12	Tarea 13	Tarea 14
Tipo de operación	1	1	1	-1	1	1	1
Contenedor	Fb	Gb	Nb	rb	Rb	Tb	Fb
Instante	40	45	50	60	65	70	40

Tabla 127. Configuración grúa de tren 3. Escenario 11

Valor de la solución	Tiempo de computación (s)
220	289,21

Tabla 128. Solución del problema 11

Problema 12

	Identificador	Inicio Ventana Temporal	Fin Ventana Temporal	Instante de llegada	Instante de salida
BUQUES	B001	10	40	10	25
	B002	20	50	25	45
	B003	15	35	15	35
	B004	30	70	35	55
	B005	50	90	50	65

Tabla 129. Solución buques. Escenario 12

	Identificador	Inicio Ventana Temporal	Fin Ventana Temporal	Instante de llegada	Instante de salida
TRENES	T001	5	35	5	20
	T002	15	45	15	25
	T003	25	55	25	35
	T004	30	65	35	40
	T005	10	35	10	25
	T006	15	60	25	30
	T007	5	20	10	45
	T008	15	45	40	50
	T009	25	55	50	60
	T0010	30	65	45	65

Tabla 130. Solución trenes. Escenario 12

Grúa de buque 1	Tare a 1	Tare a 2	Tare a 3	Tare a 4	Tare a 5	Tare a 6	Tare a 7	Tare a 8	Tare a 9	Tare a 10	Tare a 11
Tipo de operación	-1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	1
Contenedor	Ab	ab	cb	ib	kb	eb	gb	mb	Qb	Sb	qb

Instante	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
-----------------	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Tabla 131. Configuración grúa de buque 1. Escenario 12

Grúa de buque 2	Tare a 1	Tare a 2	Tare a 3	Tare a 4	Tare a 5	Tare a 6	Tare a 7	Tare a 8	Tare a 9	Tare a 10	Tare a 11
Tipo de operación	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1
Contenedor	Bb	bb	db	Eb	Gb	fb	Ob	nb	ob	Tb	rb
Instante	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60

Tabla 132. Configuración grúa de buque 2. Escenario 12

Grúa de buque 3	Tare a 1	Tare a 2	Tare a 3	Tare a 4	Tare a 5	Tare a 6	Tare a 7	Tare a 8	Tare a 9	Tare a 10	Tare a 11
Tipo de operación	-1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	1	-1	-1
Contenedor	Cb	lb	Kb	Fb	lb	Mb	hb	pb	sb	Cb	lb
Instante	10	15	20	25	30	35	40	50	60	10	15

Tabla 133. Configuración grúa de buque 3. Escenario 12

Grúa de buque 4	Tare a 1	Tare a 2	Tare a 3	Tare a 4	Tare a 5	Tare a 6	Tare a 7	Tare a 8	Tare a 9	Tare a 10	Tare a 11
Tipo de operación	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1
Contenedor	Db	Jb	Lb	jb	Hb	Nb	Pb	Rb	tb	Db	Jb
Instante	10	15	20	25	30	35	40	50	60	10	15

Tabla 134. Configuración grúa de buque 4. Escenario 12

Grúa de tren 1	Tare a 1	Tare a 2	Tare a 3	Tare a 4	Tare a 5	Tare a 6	Tare a 7	Tare a 8	Tare a 9	Tare a 10	Tare a 11
Tipo de operación	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1
Contenedor	ab	nb	Ab	Jb	kb	fb	hb	Mb	pb	tb	rb
Instante	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55

Tabla 135. Configuración grúa de tren 1. Escenario 12

Grúa de tren 2	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4	Tarea 5	Tarea 6	Tarea 7	Tarea 8	Tarea 9	Tarea 10	Tarea 11
Tipo de operación	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1
Contenedor	bb	jb	Bb	lb	lb	eb	gb	Nb	ob	sb	qb
Instante	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55

Tabla 136. Configuración grúa de tren 2. Escenario 12

Grúa de tren 3	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4	Tarea 5	Tarea 6	Tarea 7	Tarea 8	Tarea 9
Tipo de operación	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1
Contenedor	mb	cb	Db	Lb	Eb	Gb	Pb	Qb	Tb
Instante	10	15	20	25	30	35	45	55	60

Tabla 137. Configuración grúa de tren 3. Escenario 12

Grúa de tren 4	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4	Tarea 5	Tarea 6	Tarea 7	Tarea 8	Tarea 9
Tipo de operación	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1
Contenedor	ib	db	Cb	Kb	Fb	Hb	Ob	Rb	Sb
Instante	10	15	20	25	30	35	45	55	60

Tabla 138. Configuración grúa de tren 4. Escenario 12

Valor de la solución	Tiempo de computación (s)
620	373,57

Tabla 139. Solución del problema 12

Problema 13

	Identificador	Inicio Ventana Temporal	Fin Ventana Temporal	Instante de llegada	Instante de salida
BUQUES	B001	10	40	10	165
	B002	20	75	70	375
	B003	25	45	40	230
	B004	20	50	30	250
	B005	50	85	55	345
	B006	40	90	40	365
	B007	45	100	45	290
	B008	35	95	35	390
	B009	30	60	55	355
	B0010	30	55	40	410

Tabla 140. Solución buques. Escenario 13

	Identificador	Inicio Ventana Temporal	Fin Ventana Temporal	Instante de llegada	Instante de salida
TRENES	T001	5	35	5	95
	T002	15	45	15	45
	T003	25	55	25	375
	T004	35	65	65	315
	T005	30	80	65	190
	T006	25	45	30	275
	T007	20	55	20	210
	T008	35	70	60	220
	T009	60	110	65	185
	T0010	55	90	55	340
	T0011	45	75	55	255
	T0012	20	55	40	365

	T0013	35	60	35	265
	T0014	10	45	45	225
	T0015	55	80	55	390
	T0016	45	95	75	300
	T0017	65	105	75	355
	T0018	70	115	70	320
	T0019	25	80	60	405
	T0020	50	100	55	395

Tabla 141. Solución trenes. Escenario 13

Grúa de buque 1	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4	Tarea 5	Tarea 6	Tarea 7	Tarea 8	Tarea 9	Tarea 10
Tipo de operación	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1
Contenedor	Aa	Ba	Ca	Da	aa	Ma	Na	la	Oa	Ua
Instante	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
Grúa de buque 1	Tarea 11	Tarea 12	Tarea 13	Tarea 14	Tarea 15	Tarea 16	Tarea 17	Tarea 18	Tarea 19	Tarea 20
Tipo de operación	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
Contenedor	Va	Ya	Za	Ja	Cb	Gb	Pa	Kb	Ea	Ka
Instante	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105
Grúa de buque 1	Tarea 21	Tarea 22	Tarea 23	Tarea 24	Tarea 25	Tarea 26	Tarea 27	Tarea 28	Tarea 29	Tarea 30
Tipo de operación	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1
Contenedor	Ab	Bb	ba	Db	ma	ya	Wa	Qa	ca	na
Instante	110	115	120	125	130	135	140	145	150	155
Grúa de buque 1	Tarea 31	Tarea 32	Tarea 33	Tarea 34	Tarea 35	Tarea 36	Tarea 37	Tarea 38	Tarea 39	Tarea 40
Tipo de operación	1	-1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	-1
Contenedor	da	Lb	La	Ra	ia	ja	Sa	ka	Hb	Eb

Instante	160	165	170	175	180	185	190	195	200	205
Grúa de buque 1	Tarea 41	Tarea 42	Tarea 43	Tarea 44	Tarea 45	Tarea 46	Tarea 47	Tarea 48	Tarea 49	Tarea 50
Tipo de operación	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1
Contenedor	oa	za	Fa	la	ab	Fb	lb	pa	cb	Mb
Instante	210	215	220	225	230	235	240	245	250	255
Grúa de buque 1	Tarea 51	Tarea 52	Tarea 53	Tarea 54	Tarea 55	Tarea 56	Tarea 57	Tarea 58	Tarea 59	Tarea 60
Tipo de operación	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1
Contenedor	Ga	Nb	Xa	ua	Ha	bb	Jb	gb	ea	Ta
Instante	260	265	270	275	280	285	290	295	300	305
Grúa de buque 1	Tarea 61	Tarea 62	Tarea 63	Tarea 64	Tarea 65	Tarea 66	Tarea 67	Tarea 68	Tarea 69	Tarea 70
Tipo de operación	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Contenedor	qa	fa	va	ra	sa	hb	ta	ib	jb	wa
Instante	310	315	320	325	330	335	340	345	350	355
Grúa de buque 1	Tarea 71	Tarea 72	Tarea 73	Tarea 74	Tarea 75	Tarea 76	Tarea 77	Tarea 78	Tarea 79	Tarea 80
Tipo de operación	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Contenedor	xa	ga	ha	db	eb	fb	kb	lb	mb	nb
Instante	360	365	370	375	380	385	390	395	400	405

Tabla 142. Configuración grúa de buque 1. Escenario 13

Grúa de tren 1	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4	Tarea 5	Tarea 6	Tarea 7	Tarea 8	Tarea 9	Tarea 10
Tipo de operación	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1
Contenedor	ba	aa	ca	Ba	da	Ca	ka	Da	ya	la
Instante	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50

Grúa de tren 1	Tarea 11	Tarea 12	Tarea 13	Tarea 14	Tarea 15	Tarea 16	Tarea 17	Tarea 18	Tarea 19	Tarea 20
Tipo de operación	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1
Contenedor	wa	ab	cb	ia	eb	ib	jb	Aa	bb	va
Instante	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
Grúa de tren 1	Tarea 21	Tarea 22	Tarea 23	Tarea 24	Tarea 25	Tarea 26	Tarea 27	Tarea 28	Tarea 29	Tarea 30
Tipo de operación	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1
Contenedor	qa	ja	oa	ma	na	ra	za	Ma	Ka	Ab
Instante	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150
Grúa de tren 1	Tarea 31	Tarea 32	Tarea 33	Tarea 34	Tarea 35	Tarea 36	Tarea 37	Tarea 38	Tarea 39	Tarea 40
Tipo de operación	-1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1
Contenedor	nb	la	gb	ua	Qa	Ra	Ja	Ya	pa	ha
Instante	155	160	165	170	175	180	185	190	195	200
Grúa de tren 1	Tarea 41	Tarea 42	Tarea 43	Tarea 44	Tarea 45	Tarea 46	Tarea 47	Tarea 48	Tarea 49	Tarea 50
Tipo de operación	1	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1
Contenedor	Na	Oa	Pa	Bb	fb	Va	sa	ta	xa	Ua
Instante	205	210	215	220	225	230	235	240	245	250
Grúa de tren 1	Tarea 51	Tarea 52	Tarea 53	Tarea 54	Tarea 55	Tarea 56	Tarea 57	Tarea 58	Tarea 59	Tarea 60
Tipo de operación	-1	1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1
Contenedor	ea	Za	Eb	La	lb	mb	ga	Ha	Fb	hb
Instante	255	260	265	270	275	280	285	290	295	300
Grúa de tren 1	Tarea 61	Tarea 62	Tarea 63	Tarea 64	Tarea 65	Tarea 66	Tarea 67	Tarea 68	Tarea 69	Tarea 70
Tipo de operación	-1	1	1	1	1	1	1	-1	1	1

Contenedor	fa	Ga	Jb	Ta	Nb	Hb	Sa	lb	Wa	Gb
Instante	305	310	315	320	325	330	335	340	345	350
Grúa de tren 1	Tarea 71	Tarea 72	Tarea 73	Tarea 74	Tarea 75	Tarea 76	Tarea 77	Tarea 78	Tarea 79	Tarea 80
Tipo de operación	1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	1
Contenedor	Ea	Xa	db	Fa	Cb	kb	Db	Mb	Kb	Lb
Instante	355	360	365	370	375	380	385	390	395	400

Tabla 143. Configuración grúa de tren 1. Escenario 13

Valor de la solución	Tiempo de computación (s)
8700	1793,86

Tabla 144. Solución del problema 13

Problema 14

	Identificador	Inicio Ventana Temporal	Fin Ventana Temporal	Instante de llegada	Instante de salida
BUQUES	B001	10	40	10	50
	B002	20	75	25	110
	B003	25	45	35	210
	B004	20	50	20	165
	B005	50	85	70	175
	B006	40	90	55	195
	B007	45	100	70	135
	B008	35	95	95	195
	B009	30	60	40	200
	B0010	30	55	50	155

Tabla 145. Solución buques. Escenario 14

	Identificador	Inicio Ventana Temporal	Fin Ventana Temporal	Instante de llegada	Instante de salida
TRENES	T001	5	35	5	30
	T002	15	45	20	55
	T003	25	55	50	105
	T004	35	65	35	60
	T005	30	80	65	210
	T006	25	45	25	160
	T007	20	55	55	100
	T008	35	70	40	120
	T009	60	110	75	140
	T0010	55	90	60	150
	T0011	45	75	70	190
	T0012	20	55	25	105
	T0013	35	60	35	115

	T0014	10	45	15	135
	T0015	55	80	70	180
	T0016	45	95	85	195
	T0017	65	105	80	210
	T0018	70	115	105	190
	T0019	25	80	75	155
	T0020	50	100	70	205

Tabla 146. Solución trenes. Escenario 14

Grúa de buque 1	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4	Tarea 5	Tarea 6	Tarea 7	Tarea 8	Tarea 9	Tarea 10
Tipo de operación	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1
Contenedor	Aa	Ca	Ma	ba	Fa	Ha	Na	da	Oa	Ua
Instante	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
Grúa de buque 1	Tarea 11	Tarea 12	Tarea 13	Tarea 14	Tarea 15	Tarea 16	Tarea 17	Tarea 18	Tarea 19	Tarea 20
Tipo de operación	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1
Contenedor	Va	ea	Ya	Ja	fa	Mb	Pa	Qa	Cb	ha
Instante	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105
Grúa de buque 1	Tarea 21	Tarea 22	Tarea 23	Tarea 24	Tarea 25	Tarea 26	Tarea 27	Tarea 28	Tarea 29	Tarea 30
Tipo de operación	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1
Contenedor	Db	Bb	ya	ab	La	Sa	Ta	lb	nb	Eb
Instante	110	115	120	125	130	135	140	145	150	155
Grúa de buque 1	Tarea 31	Tarea 32	Tarea 33	Tarea 34	Tarea 35	Tarea 36	Tarea 37	Tarea 38	Tarea 39	Tarea 40
Tipo de operación	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Contenedor	pa	cb	ta	ua	eb	gb	fb	ib	ia	ka
Instante	160	165	170	175	180	185	190	195	200	205

Tabla 147. Configuración grúa de buque 1. Escenario 14

Grúa de buque 2	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4	Tarea 5	Tarea 6	Tarea 7	Tarea 8	Tarea 9	Tarea 10
Tipo de operación	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1
Contenedor	Ba	Da	aa	Ea	Ga	ca	Gb	Hb	lb	Jb
Instante	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
Grúa de buque 2	Tarea 11	Tarea 12	Tarea 13	Tarea 14	Tarea 15	Tarea 16	Tarea 17	Tarea 18	Tarea 19	Tarea 20
Tipo de operación	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1
Contenedor	Wa	Kb	la	Lb	Xa	ga	Za	Ab	Nb	ma
Instante	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105
Grúa de buque 2	Tarea 21	Tarea 22	Tarea 23	Tarea 24	Tarea 25	Tarea 26	Tarea 27	Tarea 28	Tarea 29	Tarea 30
Tipo de operación	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1
Contenedor	Ra	Ka	za	na	bb	kb	qa	mb	oa	ra
Instante	110	115	120	125	130	135	140	145	150	155
Grúa de buque 2	Tarea 31	Tarea 32	Tarea 33	Tarea 34	Tarea 35	Tarea 36	Tarea 37	Tarea 38	Tarea 39	Tarea 40
Tipo de operación	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Contenedor	Fb	sa	db	va	wa	hb	xa	jb	ja	la
Instante	160	165	170	175	180	185	190	195	200	205

Tabla 148. Configuración grúa de buque 2. Escenario 14

Grúa de tren 1	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4	Tarea 5	Tarea 6	Tarea 7	Tarea 8	Tarea 9	Tarea 10
Tipo de operación	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1
Contenedor	aa	ab	bb	ka	ca	za	Ca	ga	fa	Ga
Instante	5	15	20	25	30	35	40	45	50	55

Grúa de tren 1	Tarea 11	Tarea 12	Tarea 13	Tarea 14	Tarea 15	Tarea 16	Tarea 17	Tarea 18	Tarea 19	Tarea 20
Tipo de operación	-1	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1
Contenedor	pa	oa	na	ra	Ma	ta	Ya	mb	Wa	ib
Instante	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105
Grúa de tren 1	Tarea 21	Tarea 22	Tarea 23	Tarea 24	Tarea 25	Tarea 26	Tarea 27	Tarea 28	Tarea 29	Tarea 30
Tipo de operación	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1
Contenedor	sa	Oa	Ka	jb	Qa	Ra	fb	nb	Lb	db
Instante	110	115	120	125	130	135	140	145	150	155
Grúa de tren 1	Tarea 31	Tarea 32	Tarea 33	Tarea 34	Tarea 35	Tarea 36	Tarea 37	Tarea 38	Tarea 39	Tarea 40
Tipo de operación	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	1	1
Contenedor	Jb	va	ua	gb	hb	Ua	Nb	ia	Mb	Hb
Instante	160	165	170	175	180	185	190	195	200	205

Tabla 149. Configuración grúa de tren 1. Escenario 14

Grúa de tren 2	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4	Tarea 5	Tarea 6	Tarea 7	Tarea 8	Tarea 9	Tarea 10
Tipo de operación	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1
Contenedor	ba	Ba	da	Aa	wa	ya	ha	Ha	Da	ea
Instante	5	15	20	25	30	35	40	45	50	55
Grúa de tren 2	Tarea 11	Tarea 12	Tarea 13	Tarea 14	Tarea 15	Tarea 16	Tarea 17	Tarea 18	Tarea 19	Tarea 20
Tipo de operación	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1
Contenedor	xa	ma	Ea	la	qa	Xa	lb	Na	Fa	Pa
Instante	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105
Grúa de tren 2	Tarea 21	Tarea 22	Tarea 23	Tarea 24	Tarea 25	Tarea 26	Tarea 27	Tarea 28	Tarea 29	Tarea 30

Tipo de operación	1	-1	-1	1	1	-1	1	1	1	1
Contenedor	Za	ja	kb	Bb	Ab	cb	Sa	Ta	Kb	La
Instante	110	115	120	125	130	135	140	145	150	155
Grúa de tren 2	Tarea 31	Tarea 32	Tarea 33	Tarea 34	Tarea 35	Tarea 36	Tarea 37	Tarea 38	Tarea 39	Tarea 40
Tipo de operación	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1
Contenedor	Db	eb	Va	Cb	Fb	lb	Eb	Gb	Ja	la
Instante	160	165	170	175	180	185	190	195	200	205

Tabla 150. Configuración grúa de tren 2. Escenario 14

Valor de la solución	Tiempo de computación (s)
4400	1466,61

Problema 15

	Identificador	Inicio Ventana Temporal	Fin Ventana Temporal	Instante de llegada	Instante de salida
BUQUES	B001	10	40	10	30
	B002	20	75	20	65
	B003	25	45	35	65
	B004	20	50	30	110
	B005	50	85	55	140
	B006	40	90	55	100
	B007	45	100	85	125
	B008	35	95	50	130
	B009	30	60	60	145
	B0010	30	55	55	120

Tabla 151. Solución buques. Escenario 15

	Identificador	Inicio Ventana Temporal	Fin Ventana Temporal	Instante de llegada	Instante de salida
TRENES	T001	5	35	5	25
	T002	15	45	15	25
	T003	25	55	25	35
	T004	35	65	45	60
	T005	30	80	35	55
	T006	25	45	35	75
	T007	20	55	25	40
	T008	35	70	60	75
	T009	60	110	95	140
	T0010	55	90	75	125
	T0011	45	75	55	90
	T0012	20	55	55	95
	T0013	35	60	45	105

	T0014	10	45	10	125
	T0015	55	80	75	95
	T0016	45	95	75	115
	T0017	65	105	100	145
	T0018	70	115	110	140
	T0019	25	80	80	100
	T0020	50	100	90	115

Tabla 152. Solución trenes. Escenario 15

Grúa de buque 1	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4	Tarea 5	Tarea 6	Tarea 7	Tarea 8	Tarea 9	Tarea 10
Tipo de operación	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1
Contenedor	Aa	Da	ca	Ga	Ma	Pa	Ja	fa	ia	Ua
Instante	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
Grúa de buque 1	Tarea 11	Tarea 12	Tarea 13	Tarea 14	Tarea 15	Tarea 16	Tarea 17	Tarea 18	Tarea 19	Tarea 20
Tipo de operación	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1
Contenedor	la	Va	Wa	Sa	Ta	va	kb	xa	Ab	Bb
Instante	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105
Grúa de buque 1	Tarea 21	Tarea 22	Tarea 23	Tarea 24	Tarea 25	Tarea 26	Tarea 27	Tarea 28	Tarea 29	Tarea 30
Tipo de operación	1	1	1	-1	1	1	1			
Contenedor	mb	nb	db	Jb	qa	ta	ib			
Instante	110	115	120	125	130	135	140			

Tabla 153. Configuración grúa de buque 1. Escenario 15

Grúa de buque 2	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4	Tarea 5	Tarea 6	Tarea 7	Tarea 8	Tarea 9	Tarea 10
Tipo de operación	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	1	1
Contenedor	Ba	aa	Ea	Ha	Na	la	ea	Ka	ga	ja

Instante	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
Grúa de buque 2	Tarea 11	Tarea 12	Tarea 13	Tarea 14	Tarea 15	Tarea 16	Tarea 17	Tarea 18	Tarea 19	Tarea 20
Tipo de operación	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1
Contenedor	ha	Lb	Xa	Mb	Gb	wa	Eb	Za	Fb	cb
Instante	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105
Grúa de buque 2	Tarea 21	Tarea 22	Tarea 23	Tarea 24	Tarea 25	Tarea 26	Tarea 27	Tarea 28	Tarea 29	Tarea 30
Tipo de operación	1	1	1	1	1	1	1			
Contenedor	ya	za	bb	eb	ra	gb	jb			
Instante	110	115	120	125	130	135	140			

Tabla 154. Configuración grúa de buque 2. Escenario 15

Grúa de buque 3	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4	Tarea 5	Tarea 6	Tarea 7	Tarea 8	Tarea 9	Tarea 10
Tipo de operación	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1
Contenedor	Ca	ba	Fa	da	Oa	ma	na	La	Cb	ka
Instante	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
Grúa de buque 3	Tarea 11	Tarea 12	Tarea 13	Tarea 14	Tarea 15	Tarea 16	Tarea 17	Tarea 18	Tarea 19	Tarea 20
Tipo de operación	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1
Contenedor	Kb	Qa	Ra	ua	Nb	Db	Ya	lb	oa	pa
Instante	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105
Grúa de buque 3	Tarea 21	Tarea 22	Tarea 23	Tarea 24	Tarea 25	Tarea 26	Tarea 27	Tarea 28	Tarea 29	Tarea 30
Tipo de operación	-1	1	-1	1	1	1				
Contenedor	Hb	ab	lb	fb	sa	hb				
Instante	110	115	120	125	130	135				

Tabla 155. Configuración grúa de buque 3. Escenario 15

Grúa de tren 1	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4	Tarea 5	Tarea 6	Tarea 7	Tarea 8	Tarea 9	Tarea 10
Tipo de operación	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1
Contenedor	aa	bb	Aa	Ca	fa	ea	Ma	la	ga	Ja
Instante	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Grúa de tren 1	Tarea 11	Tarea 12	Tarea 13	Tarea 14	Tarea 15	Tarea 16	Tarea 17	Tarea 18	Tarea 19	Tarea 20
Tipo de operación	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1
Contenedor	wa	ua	va	Pa	cb	kb	eb	Xa	Kb	mb
Instante	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
Grúa de tren 1	Tarea 21	Tarea 22	Tarea 23	Tarea 24	Tarea 25	Tarea 26	Tarea 27	Tarea 28	Tarea 29	Tarea 30
Tipo de operación	1	1	-1	1	-1	1	1	1		
Contenedor	Eb	Mb	jb	Sa	ra	lb	Ra	Hb		
Instante	105	110	115	120	125	130	135	140		

Tabla 156. Configuración grúa de tren 1. Escenario 15

Grúa de tren 2	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4	Tarea 5	Tarea 6	Tarea 7	Tarea 8	Tarea 9	Tarea 10
Tipo de operación	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1
Contenedor	ba	ab	da	Da	ma	Ea	Na	ja	la	ya
Instante	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Grúa de tren 2	Tarea 11	Tarea 12	Tarea 13	Tarea 14	Tarea 15	Tarea 16	Tarea 17	Tarea 18	Tarea 19	Tarea 20
Tipo de operación	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1	1
Contenedor	Ga	xa	oa	Oa	db	lb	Va	Lb	Ya	Za
Instante	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
Grúa de tren 2	Tarea 21	Tarea 22	Tarea 23	Tarea 24	Tarea 25	Tarea 26	Tarea 27	Tarea 28	Tarea 29	Tarea 30

Tipo de operación	-1	1	-1	1	1	-1	1			
Contenedor	nb	Fb	qa	Bb	Qa	gb	Jb			
Instante	105	110	115	120	125	130	135			

Tabla 157. Configuración grúa de tren 2. Escenario 15

Grúa de tren 3	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4	Tarea 5	Tarea 6	Tarea 7	Tarea 8	Tarea 9	Tarea 10
Tipo de operación	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1
Contenedor	ca	Ba	na	Fa	ka	ia	za	ha	Ha	La
Instante	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Grúa de tren 3	Tarea 11	Tarea 12	Tarea 13	Tarea 14	Tarea 15	Tarea 16	Tarea 17	Tarea 18	Tarea 19	Tarea 20
Tipo de operación	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	1
Contenedor	pa	Ka	Cb	Ua	Wa	Db	fb	ta	sa	Nb
Instante	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110
Grúa de tren 3	Tarea 21	Tarea 22	Tarea 23	Tarea 24	Tarea 25	Tarea 26	Tarea 27	Tarea 28	Tarea 29	Tarea 30
Tipo de operación	1	1	-1	-1	1					
Contenedor	Ab	Ta	ib	hb	Gb					
Instante	115	120	125	130	135					

Tabla 158. Configuración grúa de tren 3. Escenario 15

Valor de la solución	Tiempo de computación (s)
2810	1273,90

Tabla 159. Solución del problema 15

Problema 16

	Identificador	Inicio Ventana Temporal	Fin Ventana Temporal	Instante de llegada	Instante de salida
BUQUES	B001	10	40	10	25
	B002	20	75	20	65
	B003	25	45	25	55
	B004	20	50	25	55
	B005	50	85	55	95
	B006	40	90	80	100
	B007	45	100	70	90
	B008	35	95	90	110
	B009	30	60	35	115
	B0010	30	55	55	85

Tabla 160. Solución buques. Escenario 16

	Identificador	Inicio Ventana Temporal	Fin Ventana Temporal	Instante de llegada	Instante de salida
TRENES	T001	5	35	5	20
	T002	15	45	15	25
	T003	25	55	25	30
	T004	35	65	50	60
	T005	30	80	40	50
	T006	25	45	35	45
	T007	20	55	25	35
	T008	35	70	45	55
	T009	60	110	65	70
	T0010	55	90	80	90
	T0011	45	75	70	95
	T0012	20	55	50	105
	T0013	35	60	35	80

	T0014	10	45	20	85
	T0015	55	80	70	105
	T0016	45	95	85	115
	T0017	65	105	105	115
	T0018	70	115	90	105
	T0019	25	80	55	65
	T0020	50	100	70	85

Tabla 161. Solución trenes. Escenario 16

Grúa de buque 1	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4	Tarea 5	Tarea 6	Tarea 7	Tarea 8	Tarea 9	Tarea 10
Tipo de operación	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1
Contenedor	Aa	aa	ca	la	Ka	Oa	Hb	Jb	oa	ga
Instante	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
Grúa de buque 1	Tarea 11	Tarea 12	Tarea 13	Tarea 14	Tarea 15	Tarea 16	Tarea 17	Tarea 18	Tarea 19	Tarea 20
Tipo de operación	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1
Contenedor	ha	Sa	qa	Ab	mb	Va	ua	wa	Eb	gb
Instante	60	65	70	75	80	85	90	95	100	110

Tabla 162. Configuración grúa de buque 1. Escenario 16

Grúa de buque 2	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4	Tarea 5	Tarea 6	Tarea 7	Tarea 8	Tarea 9	Tarea 10
Tipo de operación	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1
Contenedor	Ba	ba	da	Ja	Ga	ea	ma	ia	pa	Qa
Instante	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
Grúa de buque 2	Tarea 11	Tarea 12	Tarea 13	Tarea 14	Tarea 15	Tarea 16	Tarea 17	Tarea 18	Tarea 19	Tarea 20
Tipo de operación	-1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1

Contenedor	Mb	Ta	ra	Bb	nb	Wa	sa	xa	Fb	hb
Instante	60	65	70	75	80	85	90	95	100	110

Tabla 163. Configuración grúa de buque 2. Escenario 16

Grúa de buque 3	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4	Tarea 5	Tarea 6	Tarea 7	Tarea 8	Tarea 9	Tarea 10
Tipo de operación	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1
Contenedor	Ca	Ea	Ma	Ha	Gb	lb	na	ka	Kb	Ra
Instante	10	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Grúa de buque 3	Tarea 11	Tarea 12	Tarea 13	Tarea 14	Tarea 15	Tarea 16	Tarea 17	Tarea 18	Tarea 19	Tarea 20
Tipo de operación	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1
Contenedor	kb	Ya	ya	Ua	Xa	ta	Cb	cb	fb	ib
Instante	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110

Tabla 164. Configuración grúa de buque 3. Escenario 16

Grúa de buque 4	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4	Tarea 5	Tarea 6	Tarea 7	Tarea 8	Tarea 9	Tarea 10
Tipo de operación	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1
Contenedor	Da	Fa	Na	La	Pa	fa	ja	la	Lb	Nb
Instante	10	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Grúa de buque 4	Tarea 11	Tarea 12	Tarea 13	Tarea 14	Tarea 15	Tarea 16	Tarea 17	Tarea 18	Tarea 19	Tarea 20
Tipo de operación	1	-1	1	1	1	1	-1	1	1	1
Contenedor	lb	Za	za	ab	bb	va	Db	db	eb	jb
Instante	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110

Tabla 165. Configuración grúa de buque 4. Escenario 16

Grúa de tren 1	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4	Tarea 5	Tarea 6	Tarea 7	Tarea 8	Tarea 9	Tarea 10
Tipo de operación	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1
Contenedor	aa	ca	Da	fa	na	ya	ja	Ja	Oa	wa
Instante	5	15	20	25	30	35	40	45	50	55
Grúa de tren 1	Tarea 11	Tarea 12	Tarea 13	Tarea 14	Tarea 15	Tarea 16	Tarea 17	Tarea 18	Tarea 19	Tarea 20
Tipo de operación	-1	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1
Contenedor	kb	qa	cb	ua	Ab	ta	Va	eb	Cb	hb
Instante	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105

Tabla 166. Configuración grúa de tren 1. Escenario 16

Grúa de tren 2	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4	Tarea 5	Tarea 6	Tarea 7	Tarea 8	Tarea 9	Tarea 10
Tipo de operación	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1
Contenedor	ba	Aa	ab	ea	ma	za	Ka	la	Pa	xa
Instante	5	15	20	25	30	35	40	45	50	55
Grúa de tren 2	Tarea 11	Tarea 12	Tarea 13	Tarea 14	Tarea 15	Tarea 16	Tarea 17	Tarea 18	Tarea 19	Tarea 20
Tipo de operación	-1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1
Contenedor	lb	ra	va	Ya	Mb	sa	Ua	jb	Wa	gb
Instante	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105

Tabla 167. Configuración grúa de tren 2. Escenario 16

Grúa de tren 3	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4	Tarea 5	Tarea 6	Tarea 7	Tarea 8	Tarea 9	Tarea 10
Tipo de operación	-1	1	1	1	-1	1	-1	-1	1	1

Contenedor	da	Ca	Ea	Na	ka	La	pa	ga	Ha	Lb
Instante	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Grúa de tren 3	Tarea 11	Tarea 12	Tarea 13	Tarea 14	Tarea 15	Tarea 16	Tarea 17	Tarea 18	Tarea 19	Tarea 20
Tipo de operación	1	-1	1	1	1	1	-1	1	1	1
Contenedor	Ra	db	Za	Nb	Sa	Xa	ib	lb	Fb	Hb
Instante	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110

Tabla 168. Configuración grúa de tren 3. Escenario 16

Grúa de tren 4	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4	Tarea 5	Tarea 6	Tarea 7	Tarea 8	Tarea 9	Tarea 10
Tipo de operación	1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1
Contenedor	Ba	bb	Fa	Ma	la	ia	oa	ha	Ga	Kb
Instante	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Grúa de tren 4	Tarea 11	Tarea 12	Tarea 13	Tarea 14	Tarea 15	Tarea 16	Tarea 17	Tarea 18	Tarea 19	Tarea 20
Tipo de operación	1	-1	-1	1	1	-1	1	1	1	1
Contenedor	Qa	nb	mb	Bb	Ta	fb	Jb	Db	Gb	Eb
Instante	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110

Tabla 169. Configuración grúa de tren 4. Escenario 16

Valor de la solución	Tiempo de computación (s)
2230	1133,67

Tabla 170. Solución del problema 16

ANEXO III. PARAMETRIZACIÓN

El comportamiento del algoritmo depende en gran medida del valor de los parámetros que intervienen. Para obtener una buena relación de compromiso entre la bondad de los resultados ofrecidos por el algoritmo y el tiempo computacional requerido para alcanzarlos, es necesario determinar el valor más conveniente de dichos parámetros.

Por ello, se han llevado a cabo diferentes pruebas para estudiar el impacto de los diferentes parámetros en el algoritmo.

Función de enfriamiento

La función de enfriamiento elegida ha sido

$$t_{k+1} = \frac{t_k}{(1 + \beta \cdot t_k)}$$

donde la velocidad de enfriamiento queda determinada por el parámetro β . Para analizar la influencia del enfriamiento en los resultados alcanzados se resolvió la batería de problemas con tres posibles valores de β , obteniéndose los resultados recogidos en la Tabla 171.

	$\beta = 0.01$		$\beta = 0.05$		$\beta = 0.1$	
	Solución	Tiempo de ejecución	Solución	Tiempo de ejecución	Solución	Tiempo de ejecución
Escenario 1	265	49,19	275	10,48	265	5,63
Escenario 2	180	64,04	180	13,34	180	7,12
Escenario 3	160	88,76	160	19,06	170	10,30
Escenario 4	150	92,26	150	24,99	155	13,03
Escenario 5	385	75,31	390	16,33	390	8,61
Escenario 6	245	68,61	245	19,91	245	10,67
Escenario 7	220	94,95	220	27,03	230	14,13
Escenario 8	200	108,98	200	35,64	200	18,79
Escenario 9	2215	879,42	2245	183,06	2255	98,96
Escenario 10	1035	687,36	1095	161,34	1080	80,88
Escenario 11	770	611,75	765	170,09	825	91,06
Escenario 12	620	963,54	665	226,13	630	110,71
Escenario 13	8590	9754,52	8795	1962,56	8760	1034,71
Escenario 14	4155	7745,45	4265	1645,04	4270	848,12
Escenario 15	3015	7177,62	2915	1494,20	2900	757,62

Escenario 16	2225	6628,78	2185	1337,16	2410	744,09
---------------------	------	---------	-------------	---------	------	--------

Tabla 171. Resultados para la parametrización β

En vistas de los resultados obtenidos en las pruebas, se aprecia que el algoritmo suele encontrar mejores soluciones cuando la velocidad de enfriamiento es menor. Por contra, esto requiere un mayor coste computacional. Sin embargo, el algoritmo con un valor de $\beta = 0.05$ ha encontrado soluciones tan buenas o mejores que con $\beta = 0.01$ en 9 casos de 16, empleando menos tiempo de ejecución.

Se ha decidido por tanto tomar un valor de β que dependa del tamaño del problema. En problemas pequeños, el tiempo computacional es corto y la diferencia en tiempo computacional entre las diferentes velocidades de enfriamiento no es determinante. Por contra, imponer una velocidad de enfriamiento lenta en problemas de gran tamaño implica un alto coste de ejecución, lo cual no resulta interesante desde el punto de vista de la investigación en el que se enmarca el presente trabajo.

Los valores del parámetro β serán por tanto los reflejados en la Tabla 172.

β	Escenario
0.01	Escenario 1 a 4
0.02	Escenario 5 a 8
0.03	Escenario 9 a 12
0.04	Escenario 13 a 16

Tabla 172. Parametrización β

Temperatura inicial y temperatura final

Cuando la temperatura es alta, decrece a gran velocidad debido al carácter exponencial de la función de enfriamiento. Esto hace que aumentar la temperatura inicial solo suponga el incremento de unas pocas iteraciones más, las cuales no son representativas en el comportamiento del algoritmo.

Por otra parte, a temperaturas muy bajas la probabilidad de adoptar una solución peor es casi nula, por lo que una variación de temperatura mínima el único impacto que tiene es el de realizar una búsqueda más intensas cuando la probabilidad de aceptar peores es casi nula. Este concepto ya puede ser regulado con el parámetro L , por lo que se ha tomado un valor de t_{\min} estimado conforme a la literatura.

t_0	50
t_{\min}	0.3

Tabla 173. Parametrización t_0 y t_{\min}

Longitud de la cadena

El parámetro L permite hacer un número determinado de iteraciones en cada valor de la temperatura (t). Esta idea permite hacer búsquedas más exhaustivas cuando el valor de t es bajo y por tanto la probabilidad de aceptar una solución peor es menor.

Se ha decidido que L tome por tanto valores diferentes en función de la temperatura. Las posibles configuraciones de L y los resultados del algoritmo ante las mismas se reflejan en la Tabla 174:

	$L = \begin{cases} 1 & \text{si } 10 < t < 50 \\ 2 & \text{si } 2 < t < 10 \\ 3 & \text{si } 0,3 < t < 2 \end{cases}$		$L = \begin{cases} 5 & \text{si } 10 < t < 50 \\ 10 & \text{si } 2 < t < 10 \\ 20 & \text{si } 0,3 < t < 2 \end{cases}$		$L = \begin{cases} 2 & \text{si } 10 < t < 50 \\ 4 & \text{si } 2 < t < 10 \\ 6 & \text{si } 0,3 < t < 2 \end{cases}$	
	Solución	Tiempo de ejecución	Solución	Tiempo de ejecución	Solución	Tiempo de ejecución
Escen. 1	290	10,41	275	51,39	275	20,26
Escen. 2	180	13,42	180	67,71	180	25,80
Escen. 3	160	18,96	160	92,45	160	37,06
Escen. 4	150	24,59	150	126,27	150	48,99
Escen. 5	410	13,23	390	68,81	390	25,69
Escen. 6	245	16,16	245	83,96	245	33,32
Escen. 7	220	23,60	220	120,55	220	46,22
Escen. 8	205	29,30	200	156,13	200	57,51
Escen. 9	2340	64,35	2170	326,84	2235	127,76
Escen. 10	1115	54,11	1055	262,16	1085	109,88
Escen. 11	850	58,40	785	306,89	770	115,80
Escen. 12	670	74,03	620	378,85	645	140,78
Escen. 13	8960	354,47	8810	1922,74	8885	688,00
Escen. 14	4325	286,56	4400	1582,78	4405	560,96
Escen. 15	2870	256,76	2810	1308,89	3105	523,93
Escen. 16	2320	259,14	2230	1235,39	2245	462,78

Tabla 174. Resultados para la parametrización L

Se aprecia que cuanto mayor sea L mejores soluciones se alcanzan en escenarios grandes. Sin embargo, debido al alto coste computacional requerido para resolver problemas grandes con demasiadas iteraciones, y a la vista de que los resultados ofrecidos con una L menor no distan mucho de los encontrados con valores altos de L, se eligen los valores de L recogidos en la Tabla 175.

L	t
2	10<t<50
4	2<t<10
6	0.3<t<2

Tabla 175. Parametrización L

Tamaño del vecindario

El número de vecinos que se calculan en cada iteración (Tvec) no es un parámetro propio del SA, pero tiene mucha influencia en la calidad de las soluciones y en el coste computacional del algoritmo.

	Tvec = 1		Tvec = 10		Tvec = 30	
	Solución	Tiempo de ejecución	Solución	Tiempo de ejecución	Solución	Tiempo de ejecución
Escenario 1	345	2,76	265	20,18	265	61,32
Escenario 2	290	3,82	180	26,93	180	79,60
Escenario 3	260	5,34	160	37,29	160	111,83
Escenario 4	245	7,31	150	49,31	150	147,91
Escenario 5	475	3,84	390	26,60	400	78,24
Escenario 6	340	4,67	245	33,08	245	98,23
Escenario 7	345	7,74	220	46,15	220	138,69
Escenario 8	330	6,97	200	56,72	200	179,92
Escenario 9	2450	17,71	2150	119,16	2175	356,43
Escenario 10	1360	15,89	1100	105,98	1070	285,80
Escenario 11	1080	16,56	845	123,81	755	335,72
Escenario 12	880	23,92	660	136,78	615	427,96
Escenario 13	9530	96,79	9010	690,50	8635	1986,40
Escenario 14	5240	84,94	4405	560,96	4435	1702,01
Escenario 15	3365	73,95	3105	523,93	3020	1476,04
Escenario 16	2895	84,41	2245	462,78	2205	1340,58

Tabla 176. Resultados para la parametrización de Tvec

A la vista de los resultados queda latente la necesidad de crear un vecindario de varios vecinos, ya que los resultados obtenidas cuando se crea un único vecino no son buenos. Por contra, un vecindario demasiado grande no consigue mejorar los resultados en problemas de tamaño reducido por lo que se decide que el tamaño de la vecindad sea tan grande como número de trenes y buques compongan el problema. Así, el valor del parámetro Tvec en cada escenario se resume en la Tabla 177.

Tvec	Escenario
5	Escenario 1 a 4
6	Escenario 5 a 8
15	Escenario 9 a 12
30	Escenario 13 a 16

Tabla 177. Parametrización Tvec

