

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías
Industriales

Modelo de simulación para el análisis de grúas de
explanada en una Terminal de Contenedores
Portuaria

Autor: Aurelio López Madroñal

Tutores: Carlos Arango Pastrana

**Dep. Organización Industrial y Gestión de
Empresas II**

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Sevilla, 2014



Trabajo Fin de Grado Ingeniería
de las Tecnologías Industriales

Modelo de simulación para el análisis de grúas de explanada en una Terminal de Contenedores Portuaria

Autor:

Aurelio López Madroñal

Tutor:

Carlos Arango Pastrana

Investigador

Dep. de Organización Industrial y Gestión de Empresas II

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2014

Trabajo Fin de Grado: Modelo de simulación para el análisis de grúas de explanada en una Terminal de Contenedores Portuaria

Autor: Aurelio López Madroñal
Tutor: Carlos Arango Pastrana

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2014

El Secretario del Tribunal

Introducción

La globalización del comercio y la continua caída de las barreras comerciales han dado un gran empujón al crecimiento del transporte marítimo. En la actualidad, una serie de tendencias están redefiniendo el transporte marítimo internacional y el comercio. Se están modificando los precios, los costes, las estructuras logísticas, las ventajas comparativas, la cadena de suministro y las exigencias medio ambientales. Como consecuencia de estas modificaciones, también están cambiando la forma de actuar de los países en el ámbito comercial y el nivel de expansión en el transporte y comercio a nivel mundial.

Dentro de esta expansión del comercio y el transporte, los puertos son una pieza fundamental para la globalización. Los puertos son el lugar donde se puede cambiar el modo de transporte marítimo a terrestre, convirtiéndose en un núcleo clave en el transporte de mercancías.

En la actualidad, los puertos han evolucionado de tal manera que ya no sólo se dedican a la carga y descarga de la mercancía y al embarque y desembarque de pasajeros. Además, un puerto es un punto dónde se lleva a cabo la manipulación de mercancías, su depósito y almacenaje, su inspección y control por parte de administraciones públicas (sanidad, aduana,...), la consolidación y desconsolidación de cargas, servicios de apoyo a los buques, los servicios de valor añadido y la gestión de la información entre los diferentes agentes que intervienen en las actividades del puerto. Este carácter multifuncional se refleja claramente en la definición proporcionada por la UNCTAD (United Nations Conference on Trade and Development): *“Los puertos son interfaces entre los distintos modos de transporte y son típicamente centros de transporte combinado. En suma, sus áreas multifuncionales, comerciales e industriales donde las mercancías no sólo están en tránsito, sino que también son manipuladas, manufacturadas y distribuidas. En efecto, los puertos son sistemas multifuncionales, los cuales, para funcionar adecuadamente, deben ser integrados en la cadena logística global. Un puerto eficiente requiere no sólo infraestructura, superestructura y equipamiento adecuado, sino también buenas comunicaciones y, especialmente, un equipo de gestión dedicado y cualificado y con mano de obra motivada y entrenada”*.

La evolución de la estructura de la economía mundial está influyendo en un cambio en los flujos de comercio mundial y provocando un aumento de la demanda de servicios de transporte marítimo. La creciente importancia a nivel mundial del transporte marítimo en el ámbito económico sitúa a este modo de transporte como una de las piezas clave para el crecimiento de un país. (Secretaría de la UNCTAD, 2012)

Debido al creciente aumento de la demanda y la oferta, así como la ampliación del comercio de productos manufacturados, partes y componentes, la conectividad del transporte marítimo de línea se caracteriza por el aumento de los buques portacontenedores. (Gobierno de España. Ministerio de Fomento. Secretaría de Estado de Transportes., 2011). Aunque, el hecho de que las exigencias de sostenibilidad y las preocupaciones acerca del cambio climático ocupen el lugar central del programa político mundial y pueden afectar al transporte marítimo, el bajo consumo por contenedor en buques frente a otros medios de transporte como trenes y camiones, coloca al transporte marítimo en un lugar privilegiado. (Junta de Comercio y Desarrollo, 2013)

Como consecuencia del creciente reconocimiento a la sostenibilidad del medio ambiente como un factor importante para el transporte, este sector está experimentando una mayor presión para adaptarse a las nuevas exigencias políticas medioambientales. (Gobierno de España. Ministerio de Fomento. Secretaría de Estado de Transportes., 2011) Sin embargo, la baja contaminación por contenedor transportado en transporte marítimo comparado con el transporte terrestre, sitúa en una posición ventajosa a este medio de transporte.

Recientemente, como resultado del aumento del flujo de contenedores a nivel mundial y una economía de escala, los buques de contenedores de gran tamaño son cada vez más populares. Como consecuencia, cada vez las terminales de contenedores compiten entre ellas para convertirse en puertos centrales, y de esta forma atraer a buques de contenedores de gran tamaño. Un claro ejemplo de esta pelea por conseguir atraer los nuevos grandes buques se puede observar en el puerto de Algeciras. En Noviembre de 2013, el puerto de Algeciras recibió el primer Triple-E. Este buque, el más grande del mundo en la actualidad, con capacidad para más de 18000 TEUs y con 398 metros de largo, llegó desde Asia a la terminal APM de Algeciras quedándose durante 24 horas.

A parte de descargar contenedores, se comprobó que el puerto Juan Carlos I está en perfectas condiciones después del trabajo realizado debido al proyecto que recibe el nombre de “Algeciras 2014”. Este proyecto trata de preparar los muelles para albergar a estos mega buques invirtiendo más de 47 millones de euros. Esta inversión incluye la remodelación de cuatro de sus grúas pórtico aumentándolas de nivel para alcanzar una altura superior y la adquisición desde Asia de otras cuatro grúas que sean capaces de trabajar con los nuevos Triple-E y así hacerse con una importante parte del flujo de contenedores mundial. (Puerto Bahía de Algeciras, Noviembre, 2013).

Para poder satisfacer las necesidades que requiere el transporte de mercancías y adaptarse al transporte marítimo a nivel mundial, los puertos deben funcionar de la manera más eficiente posible. La mayoría de vida de un barco transcurre dentro de un puerto, es por ello que lo más importante es reducir el tiempo de plazo de entrega de este, conociéndose como el tiempo de plazo de entrega como el tiempo medio que un buque se queda en una terminal. Numerosos autores como (Ng W. , 2003), (Kim, 2006), (Ng W. C., 2005), (Matthew E.H. Peteringa, 2008), (Der-Horng Lee, 2006), (Chuqian Zhang, 2001) mencionan la importancia de reducir este tiempo de entrega y tratan de reducirlo mediante modelos de optimización y simulación. En los últimos años, la búsqueda de modelos para la optimización y simulación de estos procedimientos, para reducir el tiempo de entrega y como consecuencia mejorar la eficiencia de los puertos, ha sido clave para el crecimiento de este sector. Los procedimientos que se siguen a la hora de cargar y descargar un contenedor se discutirán en detalle más adelante en el documento.

Este documento discute el modelo de simulación que trata con el proceso de planificación de las grúas de patio tanto para los procesos de carga y descarga. Además, se realizará una simulación con el simulador Arena 14.0 que refleje el trabajo real de un puerto. Sin embargo, esta simulación se centrará más en las tareas realizadas por las grúas de patio o RTGCs con el objetivo de realizar un análisis de su comportamiento y eficiencia al variar la distribución de carga y descarga, el número de grúas y la distribución de estas.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido la culminación de cuatro años de duro trabajo pero de gran aprendizaje pero también el puente para continuar creciendo y llegar a ser ingeniero.

Me gustaría agradecer a Pablo Cortés Achedad y Carlos Arango Patrana por su tiempo y guía durante todo este trabajo.

También agradecerle a toda mi familia, en particular, a mis padres y hermanos por su apoyo incondicional durante todo este tiempo.

Especialmente, me gustaría dedicárselo a mis dos abuelos, que aunque por su pérdida reciente no me puedan ver convertirme en un ingeniero, pensar en ellos siempre me ha dado fuerzas para seguir adelante.

Índice

1.	El comercio marítimo mundial.....	1
1.1.	Mercancías transportadas	5
1.2.	Costes en el transporte de mercancías.....	5
2.	Impacto medioambiental del transporte marítimo.....	11
3.	Sistema intermodal del transporte.....	17
3.1.	Transporte por Carretera	17
3.2.	Transporte por Ferrocarril	18
3.3.	Transporte Aéreo.....	20
3.4.	Transporte Marítimo	21
3.5.	Sistema Intermodal del transporte.....	22
3.5.1.	Concepto de intermodalidad.....	22
3.5.2.	Infraestructura del transporte intermodal. Clasificación y funciones.....	23
3.5.3.	La intermodalidad como alternativa.....	25
4.	Terminal de contenedores portuaria. Conceptos Básicos.....	27
4.1.	El contenedor y sus diferentes tipos.....	27
4.2.	Equipos de manipulación y transporte de contenedores en TCPs (Terminales de Contenedores Portuarias)	30
4.2.1.	Carga y Descarga de Buques.....	31
4.2.2.	Transporte a través de la terminal:	34
4.2.3.	Almacenamiento y Distribución de Contenedores:	35
4.3.	Buques portacontenedores.....	37
4.3.1.	Aparición y evolución de los buques portacontenedores	38
4.3.2.	El futuro de los buques portacontenedores, el triple e.....	38
4.4.	Concepto de terminal de contenedores portuaria	40
4.4.1.	Subsistema de carga-descarga de contenedores	41
4.4.2.	Subsistema de conexión interna	43
4.4.3.	Subsistema de recepción y entrega terrestre.....	44
4.4.4.	Subsistema de almacenamiento de contenedores	44
5.	Planificación de TCPs	47
5.1.	Análisis de los subsistemas de un puerto	48
5.1.1.	Planificación de estiba en buque o Plan maestro de muelle.....	49
5.1.2.	Relocalización de contenedores	49
5.1.3.	Optimización/ programación de las grúas	50

5.1.4	Optimización del transporte terrestre	51
6.	Método de Simulación	52
6.1.	Grafo de Eventos.....	54
6.2.	Diagrama de Ciclo de Actividades.....	55
6.3.	Simulador Arena	55
6.4.	Descripción Arena.....	57
7.	Estudios Realizados.....	60
7.1.	Estudio 1: Comparativa de las distribuciones de carga y descarga en la zona de almacenamiento.....	60
7.1.1.	Recogida de Resultados:	62
7.1.2.	Conclusiones:	75
7.2.	Estudio 2: Comparativa del número y distribución de RTGs en la zona de almacenamiento.....	78
7.2.1.	Recogida de resultados.....	78
7.2.2.	Conclusiones:	93
8.	Conclusión.....	94
	Bibliografía	96

Índice de imágenes

Imagen 1: Camión en el Puerto de Algeciras	17
Imagen 2: Tren de transporte de mercancías por la línea Barcelona-Granollers-Girona-Portbon-Cerbère	18
Imagen 3: Transporte Aéreo de Mercancías.....	20
Imagen 4: Buque de transporte de Contenedores Puerto Algeciras	21
Imagen 5 Grúa polivalente	31
Imagen 6 Grúa pórtico.....	32
Imagen 7 Grúa pórtico recrecida.....	33
Imagen 8 Cabeza tractora desplazándose por la zona de almacenake.....	34
Imagen 9 Multitráiler	34
Imagen 10 AGVs.....	35
Imagen 11 Grúa RTG durante una operación de carga	36
Imagen 12 Carretilla pórtico	36
Imagen 13 Cargador.....	37
Imagen 14 Grúa apiladora	37
Imagen 15 Majestic, el primer triple E.....	39
Imagen 16 Grúas pórtico de muelle durante una operación de descarga de un buque.....	42
Imagen 17 Cabezas tractoras con plataformas desplazándose dentro de la terminal	43
Imagen 18 Entrada por carretera de una TCP	44
Imagen 19 Zona de almacenaje.....	46

Índice de figuras

Figura 1 Cadena de transporte.....	4
Figura 2 Estructura de costes de transporte terrestre.....	6
Figura 3 Estructura de costes de transporte marítimo).....	8
Figura 4 Gramos de CO2 generados por tonelada transportada y por kilómetro	12
Figura 5 Consumo de energía final por medio de transporte en la UE-27. Año 2007	15
Figura 6 Red de transporte ferroviario en Europa.....	19
Figura 7 Esquema de tranposte Intermodal.....	25
Figura 8 Contenedor Estandar.....	28
Figura 9 Contenedor Open top.....	29
Figura 10 Contenedor Flat tracks	29
Figura 11 Contenedor Refrigerado.....	29
Figura 12 Tanques.....	30
Figura 13 Contenedor Aislante	30
Figura 14 Evolución de las grúas pórtico	32
Figura 15 Evolución de los buques portacontenedores	38
Figura 16 Emisión de CO2 Triple E.....	40
Figura 17 Esquema del proceso de carga y descarga de contenedores entre un buque y la explanada.....	41
Figura 18 Layout de una terminal marítima de contenedores portuaria	43
Figura 19 Flujo de contenedores en las operaciones de las terminales	47
Figura 20 Clasificación de las principales operaciones de una TCM	48
Figura 22 Yard crane scheduling	50
Figura 23 Distribución RTGs en la ZA.....	51
Figura 24 Esquema de un grafo de eventos.....	54
Figura 25 Ejemplo de un diagrama de ciclo de actividades	55
Figura 26: Mapa de la distribución del puerto de contenedores simulado en Arena.....	57
Figura 27: Distribución izquierda y derecha de la zona de almacenamiento	60
Figura 28: Distribución de la zona alejada y la zona cercana dentro de la zona de almacenamiento.....	61

Índice de tablas

Tabla 1: Lista de los puertos más importantes del mundo	3
Tabla 2: Evolución del tráfico marítimo internacional en los años que se indica (en millones de toneladas cargadas)	3
Tabla 3 Costes del transporte terrestre en España	7
Tabla 4 Estructuras de costes del transporte marítimo	8
Tabla 5 Comparativa costes externos unitarios	9
Tabla 6 Consumo energético para distintos modos de transporte	14
Tabla 7 Emisiones de GEI del transporte de mercancías en el Año 2007	14
Tabla 8 Tamaño de contenedores	30
Tabla 9 Evolución grúas	33
Tabla 10 Tiempos medio de espera de los camiones.	67
Tabla 11 Tiempos medios de descarga y carga para cada una de las distribuciones	71
Tabla 12 Carga de trabajo de las grúas RTG en las cuatro distribuciones	75
Tabla 13 Tiempo de espera de los buques 1 al 4 en las distribuciones 1 al 10	81
Tabla 14 Tiempo de espera de trenes para las distribuciones 1 a 10	83
Tabla 15 Tiempo medio espera de camiones en todas las distribuciones	86
Tabla 16 Tiempos medios de descarga y carga para todas las distribuciones	90
Tabla 17 Nivel de ocupación de las RTGs en todas las distribuciones	92

Índice de gráficos

Gráfico 1 Comparativa del crecimiento del PIB y del comercio marítimo y mundial de mercancías.....	1
Gráfico 2 Tráfico nacional e internacional de mercancías en unidades de transporte intermodal en la UE-27. Año 2009.....	4
Gráfico 3 Modo de transporte utilizado en la UE	13
Gráfico 4 Modo de transporte utilizado en la UE	13
Gráfico 5 Consumo energético según el modo de transporte utilizado.....	14
Gráfico 6 Costes directos de vehículos articulados portacontenedores a 31 de octubre de 2010	16
Gráfico 7 Tiempo espera de los buques en Distribución 1.....	62
Gráfico 8 Tiempo espera de los buques en Distribución 2.....	63
Gráfico 9 Tiempo de espera de los buques en Distribución 3.....	63
Gráfico 10 Tiempo de espera de los buques en Distribución 4.....	63
Gráfico 11 Tiempo espera Trenes en Distribución 1	64
Gráfico 12 Tiempo espera Trenes en Distribución 2	64
Gráfico 13 Tiempo espera Trenes en Distribución 3	65
Gráfico 14 Tiempo espera Trenes en Distribución 4	65
Gráfico 15 Tiempo espera de camiones en Distribución 1	66
Gráfico 16 Tiempo espera de camiones en Distribución 2	66
Gráfico 17 Tiempo espera de camiones en Distribución 3	67
Gráfico 18 Tiempo espera de camiones en Distribución 4	67
Gráfico 19 Tiempo tareas de descarga en Distribución 1	68
Gráfico 20 Tiempo tareas de descarga en Distribución 2	68
Gráfico 21 Tiempo tareas de descarga en Distribución 3	69
Gráfico 22 Tiempo tareas de descarga en Distribución 4	69
Gráfico 23 Tiempo tareas de carga en Distribución 1.....	70
Gráfico 24 Tiempo tareas de carga en Distribución 2.....	70
Gráfico 25 Tiempo tareas de carga en Distribución 3.....	70
Gráfico 26 Tiempo tareas de carga en Distribución 4.....	70
Gráfico 27 Tiempo solicitud cabezas tractoras en Distribución 1.....	72
Gráfico 28 Tiempo solicitud cabezas tractoras en Distribución 2.....	72
Gráfico 29 Tiempo solicitud cabezas tractoras en Distribución 3.....	72
Gráfico 30 Tiempo solicitud cabezas tractoras en Distribución 4.....	72
Gráfico 31 Tareas atendidas por hora por la RTG1 en la Distribución 1	73
Gráfico 32 Número de desplazamientos por hora RTG1 en la Distribución 1	73
Gráfico 33 Tareas atendidas por hora por la RTG3 en la Distribución 1	74
Gráfico 34 Número de desplazamientos por hora RTG3 en la Distribución 1	74
Gráfico 35 Tareas atendidas por hora por la RTG7 en la Distribución 1	74
Gráfico 36 Número de desplazamientos por hora RTG7 en la Distribución 1	75
Gráfico 37 Tiempo espera buques en Distribución 1	79
Gráfico 38 Tiempo espera buques en Distribución 4	80
Gráfico 39 Tiempo espera buques en Distribución 8	80
Gráfico 40 Tiempo espera buques en Distribución 5	80
Gráfico 41 Tiempo espera buques en Distribución 6	81

Gráfico 42	Tiempo espera trenes Distribución 5.....	82
Gráfico 43	Tiempo espera trenes Distribución 6.....	82
Gráfico 44	Tiempo espera trenes Distribución 1.....	82
Gráfico 45	Tiempo espera camiones en Distribución 1	83
Gráfico 46	Tiempo espera camiones en Distribución 5	84
Gráfico 47	Tiempo espera camiones en Distribución 7	84
Gráfico 48	Tiempo espera camiones en Distribución 4	85
Gráfico 49	Tiempo espera camiones en Distribución 4	85
Gráfico 50	Tiempo tareas descarga en Distribución 4	86
Gráfico 51	Tiempo tareas descarga en Distribución 1	87
Gráfico 52	Tiempo tareas descarga en Distribución 10	87
Gráfico 53	Tiempo tareas carga en Distribución 1.....	87
Gráfico 54	Tiempo tareas carga en Distribución 2.....	88
Gráfico 55	Tiempo tareas carga en Distribución 5.....	88
Gráfico 56	Tiempo tareas carga en Distribución 6.....	88
Gráfico 57	Tiempo tareas carga en Distribución 9.....	89
Gráfico 58	Tiempo tareas carga en Distribución 10.....	89
Gráfico 59	Tareas realizadas en cada hora por la RTG3 en Distribución 2	90
Gráfico 60	Desplazamientos realizados por hora por la RTG3 en la Distribución 2	91
Gráfico 61	Tareas realizadas en cada hora por la RTG1 en Distribución 2	91
Gráfico 62	Desplazamientos realizados por hora por la RTG1 en la Distribución 2	91
Gráfico 63	Tareas realizadas en cada hora por la RTG7 en Distribución 2	92
Gráfico 64	Desplazamientos realizados por hora por la RTG7 en la Distribución 2	92

1. El comercio marítimo mundial

La evolución de la estructura de la economía mundial está influyendo en un cambio en los flujos de comercio y provocando un aumento de la demanda de servicios de transporte marítimo.

Según la UNCTAD, (Secretaría de la UNCTAD, 2012) existe una estrecha relación entre el producto interior bruto mundial (PIB), el comercio de mercancías y el transporte marítimo. Esto se debe a que el transporte marítimo, al ser una demanda derivada, debe su evolución y la del comercio marítimo internacional a las condiciones macroeconómicas mundiales. Incluso estudios realizados por la UNCTAD en el año 2011 reflejaron que el comercio de mercancías había crecido más rápidamente que el PIB. Factores como el aumento del comercio de bienes intermedios y componentes, el crecimiento de las cadenas de suministro mundiales, y procesos de producción a escala mundial, han dado lugar a este fenómeno. Como se refleja en el gráfico 1, ambos PIB y comercio de mercancías han seguido una trayectoria similar de crecimiento, aunque como se ha comentado anteriormente, el comercio de mercancías ha superado al PIB en crecimiento.

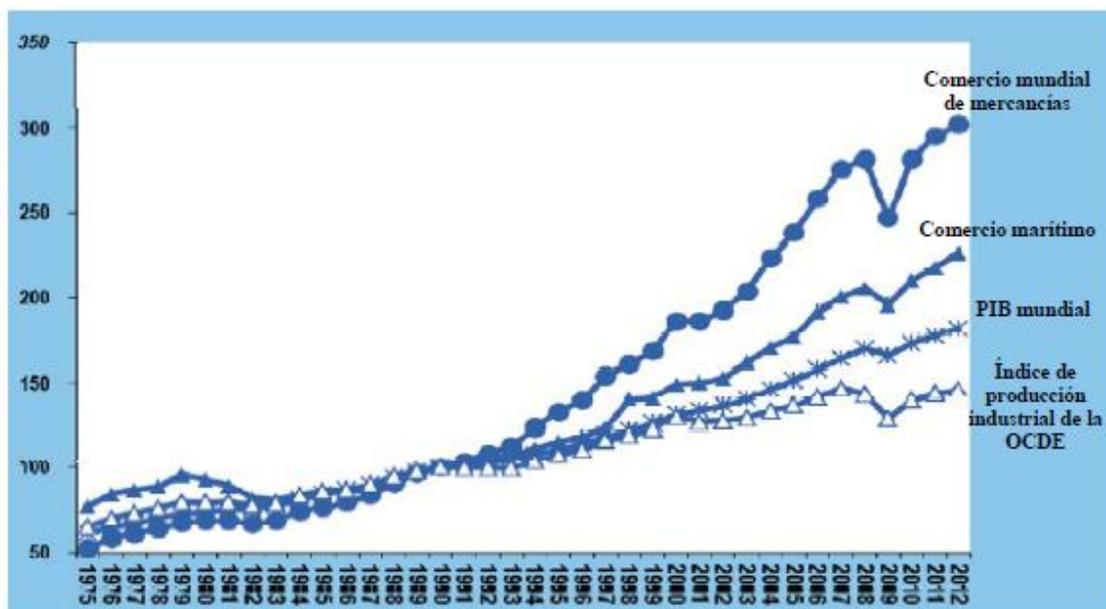


Gráfico 1 Comparativa del crecimiento del PIB y del comercio marítimo y mundial de mercancías (Secretaría de la UNCTAD, 2012)

Los países más desarrollados se están convirtiendo en los principales exportadores e importadores mundiales. Al aumentar la contribución de estos países al crecimiento del PIB mundial y al comercio de mercancías, su aportación al comercio marítimo mundial también ha sido ampliada. Hasta el 60% del volumen del comercio marítimo mundial se origina en los países más desarrollados, siendo estos mismos los destinatarios de un 57% de este comercio. En la actualidad, Asia se ha convertido en la zona de carga y descarga más importante a nivel mundial, seguida por Europa, América continental, África y Oceanía. En la tabla 1 se muestra la lista de puertos más importantes del mundo, lo cual refleja este hecho. Para medir el volumen de mercancía transportada, se mide el número de contenedores TEU transportados. TEU (Twenty foot Equivalent Unit) es el contenedor estándar de veinte pies que se utiliza en el

**Modelo de simulación para el análisis de grúas de explanada en una Terminal de Contenedores
Portuaria**

transporte marítimo. Más adelante se hablará más en profundidad sobre los contenedores y sus diferentes tipos. Como se puede observar, de entre los 20 puertos más importantes, sólo Rotterdam, Hamburgo y Antwerp pertenecen a Europa y Los Ángeles como representación norte americana. Mientras tanto, el resto de puertos pertenece a Asia, demostrando la importancia que ha cobrado este continente en el transporte de mercancías.

Ranking	Puerto, País	Volumen 2012 (mil TEUs)	Volumen 2011 (mil TEUs)
1	Shanghai, China	32,53	31,74
2	Singapur, Singapur	31,65	29,94
3	Hong Kong, China	23,10	24,38
4	Shenzhen, China	22,94	22,57
5	Busan, Corea del sur	17,04	16,18
6	Ningbo-Zhoushan, China	16,83	14,72
7	Guangzhou Harbor, China	14,74	14,42
8	Qingdao, China	14,50	13,02
9	Jebel Ali, Dubai, Emiratos Árabes Unidos	13,30	13,00
10	Tianjin, China	12,30	11,59
11	Rotterdam, Holanda	11,87	11,88
12	Port Kelang, Malasia	10,00	9,60
13	Kaohsiung, Taiwan, China	12,30	11,59
14	Hamburgo, Alemania	8,86	9,01
15	Antwerp, Bélgica	8,64	8,66
16	Los Ángeles, USA	8,08	7,94
17	Dailan, China	8,06	6,40
18	Kehin Ports, Japón	7,85	7,64
19	Tanjung Pelepas, Malasia	7,70	7,50
20	Xiamen, China	7,20	6,47
21	Bremen/Bremerhaven, Alemania	6,12	5,92
22	Tanjung Priok, Jakarta, Indonesia	6,10	5,62
23	Long Beach, USA	6,05	6,06
24	Laem Chabang, Tailandia	5,93	5,73
25	Nueva York-Nueva Jersey, USA	5,53	5,50
26	Ho Chi Minh, Vietnam	5,19	4,53
27	Lianyungang, China	5,02	4,85
28	Hanshin Ports, Japón	5,00	4,80
29	Yingkou, China	4,85	4,03
30	Jeddah, Arabia Saudí	4,74	4,01
31	Valencia, España	4,47	4,33
32	Columbo, Sri Lanka	4,26	4,26
33	Jawaharlal Nehru, India	4,26	4,32
34	Bahía de Algeciras, España	4,07	3,60
35	Sharjah, Emiratos Árabes Unidos	4,00	3,23
36	Felixtowe, UK	3,95	3,74
37	Port Said, Egipto	3,91	3,91
38	Manila, Filipinas	3,71	3,46
39	Salalah, Oman	3,63	3,20
40	Colon, Panamá	3,52	3,37
41	Balboa, Panamá	3,30	3,23
42	Santos, Brazil	3,17	2,99
43	Ambarli, Turquía	3,10	2,69

Modelo de simulación para el análisis de grúas de explanada en una Terminal de Contenedores Portuaria

44	Georgia Ports, USA	2,97	2,94
45	Nagoya, Japón	2,87	2,62
46	Tanjung Perak, Surabaya, Indonesia	2,85	2,64
47	Gioia Tauro, Italia	2,72	2,30
48	Metro Vancouver, Canadá	2,71	2,51
49	Melbourne, Australia	2,60	2,51
50	Durban, Sudáfrica	2,59	2,71

Tabla 1: Lista de los puertos más importantes del mundo (World Shipping Council, 2013)

En los últimos cuarenta años, el tráfico marítimo mundial ha crecido conforme a una tasa media anual del 3%, pasando de 2600 millones de toneladas en 1970 a 8400 millones en 2010 como refleja la tabla 2. La tabla 2 también muestra el crecimiento de la carga transportada en elementos clave como son el petróleo y gas, los graneles principales y otro tipo de carga seca. Aunque el transporte marítimo puede encontrar obstáculos para su crecimiento y sostenibilidad como la incertidumbre económica, limitaciones en la inversión comercial, las tensiones geopolíticas, además de otros factores, se prevé un crecimiento del comercio marítimo en los próximos años. (Junta de Comercio y Desarrollo, 2013). Los últimos registros reflejaron que el número de contenedores TEU en 2008 era de 516255115 contenedores, en 2011 llegó a 580022280 contenedores y había alcanzado la cifra de 601772123 contenedores en el año 2012. (UNCTADstat, 2013)

Año	Petróleo y gas	Graneles principales	Otra carga seca	Total (todas las mercancías)
1970	1440	448	717	2605
1980	1871	608	1255	3704
1990	1755	988	1265	4008
2000	2163	1295	2526	5984
2005	2422	1709	2978	7109
2006	2698	1814	3188	7700
2007	2747	1953	3334	8034
2008	2742	2065	3422	8229
2009	2642	2085	3131	7858
2010	2772	2335	3302	8409
2011	2796	2477	3475	8748

Tabla 2: Evolución del tráfico marítimo internacional en los años que se indica (en millones de toneladas cargadas) (Secretaría de la UNCTAD, 2012)

El transporte marítimo forma parte de la logística internacional y representa el 80% del volumen del comercio mundial. Aunque en la cadena de suministros se requiere de la utilización de sistemas de transporte multimodal (incluyendo camiones, trenes, etc) para el movimiento de mercancías, el transporte marítimo sigue siendo la columna vertebral del comercio globalizado. Un simple esquema de una cadena de suministros con un transporte intermodal se muestra en la figura 1. En este esquema de la figura 1 se observa como el transporte marítimo actúa de puente entre los puertos de origen y destino. Por otro lado, para conectar los puertos con los exportadores y los clientes, se utiliza suele utilizar el transporte por carretera. Este transporte ofrece mayor flexibilidad que el transporte marítimo, y de ahí que sea clave dentro del transporte de mercancías. Más adelante se discutirá en profundidad el transporte intermodal y su influencia en el transporte de mercancías.

Modelo de simulación para el análisis de grúas de explanada en una Terminal de Contenedores Portuaria

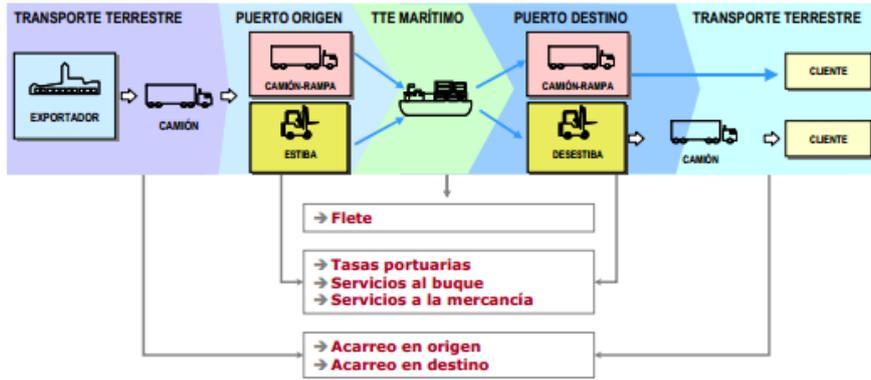


Figura 1 Cadena de transporte (Gobierno de España. Ministerio de Fomento. Secretaría de Estado de Transportes., 2011)

Los datos que arroja el sector del transporte en la Unión Europea es un claro ejemplo de esta realidad acerca de la gran importancia del transporte marítimo. El total de exportaciones de la UE-27 con el resto del mundo alcanzó en el año 2008, 530,2 millones de toneladas, de las cuales el 74,8% se realizaron por mar, mientras que las importaciones fueron mucho mayores con 1.7974 millones de toneladas siendo también el modo marítimo el predominante en el movimiento de flujos (71,7%).

De la mercancía utilizada en la UE-27, el 58,7% de la mercancía se movió por carretera, el 5,02% por ferrocarril y el 33,57% por transporte marítimo. En el gráfico 2 se muestra la diferencia en volumen de carga de mercancías para los distintos tipos de contenedores para los medios de transporte marítimo, de carretera y ferrocarril. Observándose, como se ha mencionado anteriormente, un mayor volumen en el transporte por carretera, seguido por el transporte marítimo como medio más utilizado dentro de la Unión Europea, y siendo para el caso del transporte por ferrocarril mucho menor.

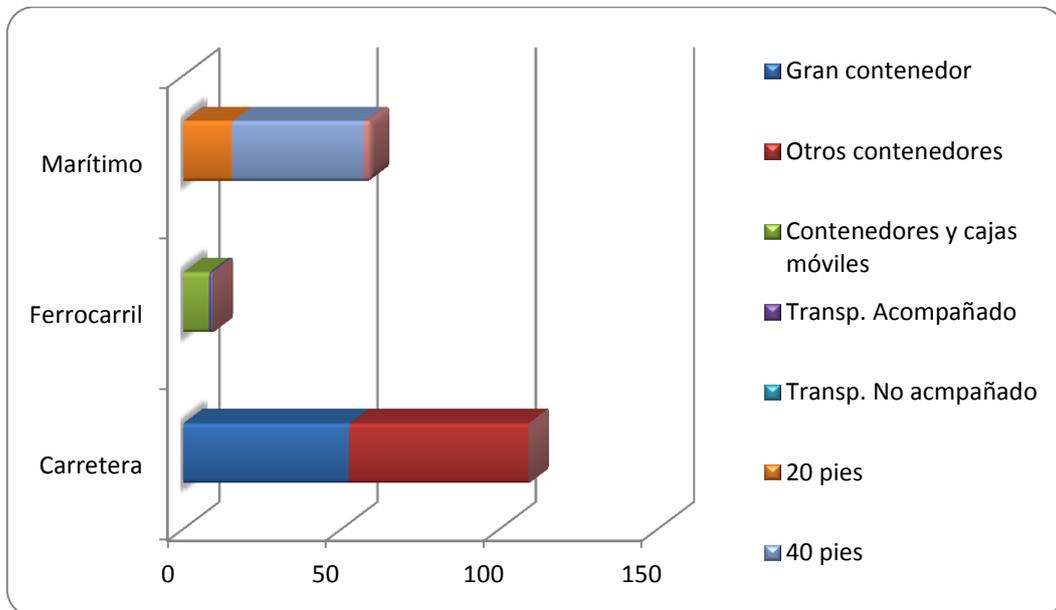


Gráfico 2 Tráfico nacional e internacional de mercancías en unidades de transporte intermodal en la UE-27. Año 2009 (Gobierno de España. Ministerio de Fomento. Secretaría de Estado de Transportes., 2011)

1.1. Mercancías transportadas

En 2011, según (Junta de Comercio y Desarrollo, 2013), la carga transportada en buques tanque representó aproximadamente un tercio del tonelaje total, y la “otra carga seca” incluida la transportada en contenedores, representó alrededor del 40%. El rápido aumento de los volúmenes de carga seca, en particular el comercio mediante buques contenedores impulsó el incremento.

Además, añadiendo a este dato, el hecho que las materias primas sigan dominando la estructura del comercio marítimo ha contribuido al crecimiento del transporte a través de buques. Este hecho se ve reflejado en que la proporción restante de la carga transportada (28%) correspondió a las cinco principales mercancías secas a granel. Las cinco principales mercancías a granel son:

- Mineral de hierro
- Carbón
- Cereales
- Bauxita
- Alúmina
- Roca fosfática

La unidad toneladas-milla, que mide la verdadera demanda de servicios de transporte marítimo y tonelaje que considera distancia y disponibilidad de buques, ha aumentado respecto a todas las cargas. La demanda de estas materias primas guarda estrecha relación con el aumento de la población en las regiones en desarrollo y las elevadas necesidades de desarrollo de infraestructuras en esos países. Por ejemplo, en 2011 China representó aproximadamente los dos tercios de las importaciones mundiales de mineral de hierro. (Junta de Comercio y Desarrollo, 2013)

Otro sector importante en el comercio mundial es el del transporte de combustible. En lo que respecta al comercio de petróleo, el volumen ha crecido a un ritmo más lento debido en particular a la reducción de la demanda de petróleo crudo en economías avanzadas. Sin embargo, la demanda de gas natural ha aumentado debido a la mayor capacidad de suministro. También ha tenido una importante influencia el hecho que el gas natural es una alternativa más ecológica que otros combustibles. El reciente aumento de combustibles no convencionales y del gas natural está contribuyendo al transporte marítimo. Los países en desarrollo se están convirtiendo en los mayores productores y consumidores de energía. Especialmente China está teniendo un importante impacto debido a su activa estrategia de asegurar un abastecimiento energético.

1.2. Costes en el transporte de mercancías

En general, el coste de transporte en el modo marítimo es menor al de otros modos de transporte, por su rendimiento energético, operativo y de economía de escala derivada de transportar grandes cargas en largas distancias. Además, el avanzado grado de liberación del

modo marítimo proporciona una tarificación del transporte directamente ligada a los costes de producción y, por tanto, unos precios más competitivos que los del transporte terrestre.

Viendo que el transporte terrestre y el marítimo son los de mayor peso en el comercio internacional, es necesario realizar una comparación de los costes de estos medios de transporte.

Analizando los costes del transporte terrestre, se puede observar en la figura 2, la estructura de los costes propuesta por el ministerio de transporte español. Se puede observar que los costes directos están formados por costes provenientes del uso de la infraestructura y de la explotación del servicio. Los costes de explotación del servicio están compuestos por unos costes fijos y unos costes variables característicos del transporte por carretera. Destacan los costes de operación, dónde se encuentran los costes de personal, y los costes variables, dónde cabe destacar el coste de combustible. Estos dos costes, personal y combustible, suelen tener un amplio peso como se analizará más adelante junto con la tabla 3.

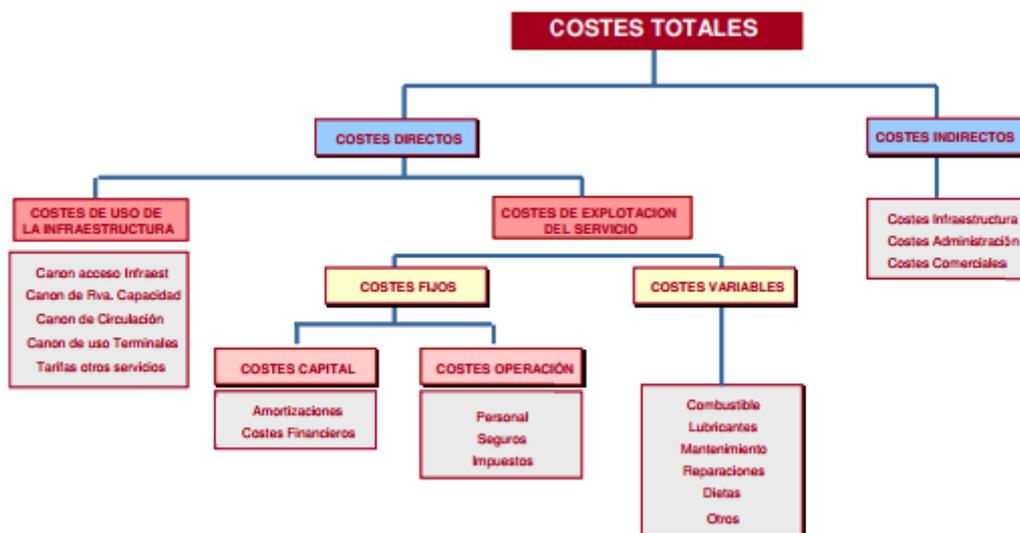


Figura 2 Estructura de costes de transporte terrestre (Gobierno de España. Ministerio de Fomento. Secretaría de Estado de Transportes., 2011).

Teniendo en cuenta la estructura de costes de la figura 2, en la tabla 3 se muestra como el ministerio de fomento cuantifica cada uno de los costes identificados en la estructura de costes del transporte terrestre. Dentro de estos costes se listan los sólo los costes directos sin tener en cuenta los costes indirectos, como costes por infraestructura y costes comerciales que se mostraban en la figura 2. Sin embargo, la tabla 3 analiza los costes por tiempo que supone utilizar el transporte por carretera como son el coste de personal seguros, amortización y financiación del vehículo. Incluyendo los costes por dietas del conductor y los costes fiscales que se deben asumir. Por otro lado, la tabla 3 muestra los costes por kilómetro debido al uso del transporte por carretera. Entre ellos se encuentran los costes relacionados a la utilización del vehículo, como son reparaciones y mantenimiento, y por supuesto el coste del combustible. De esta manera, la tabla 3 aporta el coste directo del transporte por carretera en euros por kilómetro recorrido y en euros por kilómetro cargado.

En la tabla 3 se puede observar que el coste mas representativo es el combustible con un 33% solo seguido por el de personal de conducción con 27.70%. estos dos costes suman el 60.70% de los costes por trasportar un contenedor. Lo anterior evidencia que la flexibilidad del

Modelo de simulación para el análisis de grúas de explanada en una Terminal de Contenedores Portuaria

transporte terrestre y los beneficios que este conlleva a nivel operativo hacen que sus usuarios tengan que pagar elevados costes por cada contenedor transportado. A diferencia del transporte marítimo los costes por personal y combustible no se pueden dividir entre varios contenedores transportados ya que un camión hasta el momento solo puede transportar un contenedor por cada trayecto. Para comprender esto más adelante se muestran los costes del transporte marítimo.

	Costes directos anuales	
	Euros	Distribución(%)
Costes directos	105.334,40 €	100,00%
Costes por tiempo	59.024,54 €	56,00%
Amortización vehículo	9.741,43 €	9,20%
Financiación del vehículo	1.029,84 €	1,00%
Personal de conducción	29.151,12 €	27,70%
Seguros	6.881,81 €	6,50%
Costes fiscales	949,34 €	0,90%
Dietas	11.271,00 €	10,70%
Costes kilométricos	46.309,86 €	44,00%
Combustible	34.780,51 €	33,00%
Neumáticos	6.679,35 €	6,30%
Mantenimiento	1.940,00 €	1,80%
Reparaciones	2.910,00 €	2,80%
Kilometraje anual (km/año)	100.000,00 €	
Kilometraje anual en carga (km/año)	85.000,00 €	
Costes directos (euros/km recorrido)	1,05 €	
Costes directos (euros/km cargado)	1,24 €	

Tabla 3 Costes del transporte terrestre en España (Gobierno de España. Ministerio de Fomento. Secretaría de Estado de Transportes., 2011)

Analizando los costes del transporte de mercancías para el medio de transporte marítimo y tomando como referencia las tasas aplicadas en 2010 por la Autoridad Portuaria de Bahía de Algeciras (APBA), puerto nacional que mueve mayor volumen de mercancía, se calculan los costes del transporte marítimo.

Como se hizo anteriormente, la figura 3 muestra una descomposición de los costes totales que suponen el transporte marítimo propuesta por el ministerio de transporte español. Una vez más, los costes directos están divididos entre costes por uso de la infraestructura y costes por explotación del servicio. A diferencia del transporte por carretera, en el transporte por infraestructura, se encuentran costes por servicios portuarios o costes de estiba. Sin embargo, dentro de los costes fijos y costes variables, se encuentran costes como los relacionados a la tripulación, seguro y mantenimiento o costes por combustibles, al igual que en el transporte terrestre. De esta manera se pueden analizar y comparar los costes de ambos medios de transporte, como se hará a continuación junto a la tabla 4.

Modelo de simulación para el análisis de grúas de explanada en una Terminal de Contenedores Portuaria

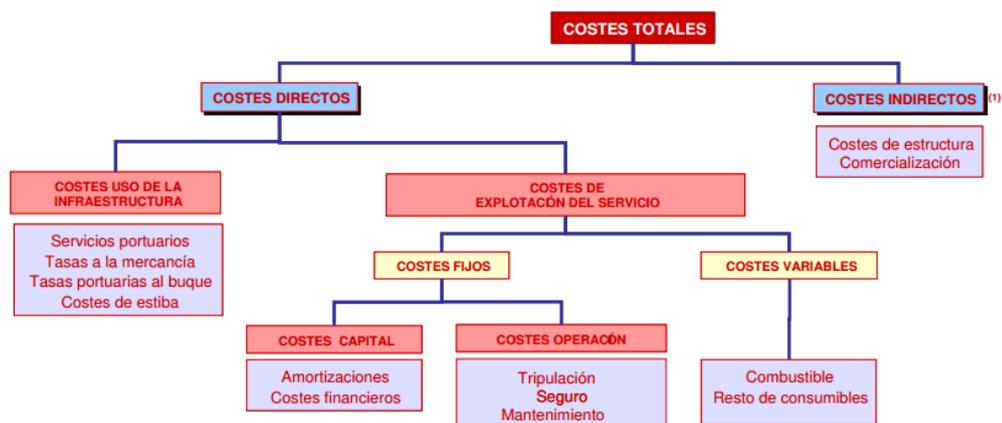


Figura 3 Estructura de costes de transporte marítimo (Gobierno de España. Ministerio de Fomento. Secretaría de Estado de Transportes., 2011)

La tabla 4 incluye los costes directos relacionados con el uso del transporte marítimo de mercancías. Esta tabla muestra, a diferencia de la tabla 3, los costes relacionados con la infraestructura, como son los costes relacionados con las tasas de mercancías, los costes de estiba y los costes de amarre. Sin embargo, la tabla 4 incluye los costes directos relacionados con la tripulación, la amortización, los seguros o el combustible. Con un simple vistazo, se puede observar que la mayoría de los costes son los provenientes por la explotación del servicio, un 70%.

Se puede observar en la tabla 4, que muestra la estructura del coste de transporte marítimo, los costes por el uso de la infraestructura totales estimados ascienden a 4,26 M€/año y los costes totales de explotación del servicio marítimo (costes fijos más costes variables), suponen 9,80 M€/año.

	€/Km Semirremolque	€/Km	Costes Totales (€/año)	%coste total (€)
COSTES USO DE LA INFRAESTRUCTURA	0,1	19,03	4.263.314,00 €	30%
Costes portuarios imputables al barco	0,0077	1,47	328.916,00 €	2,30%
Tasas aplicables al buque	0,0015	0,28	63.074,00 €	0,40%
Costes de servicios portuarios al buque	0,0062	1,19	265.842,00 €	1,90%
Remolcaje	0,0024	0,45	101.567,00 €	1%
Amarraje	0,0024	0,45	101.567,00 €	1%
Practicaje	0,015	0,28	62.031,00 €	0%
Señalización marítima	0,00002	0	677,00 €	0%
Costes portuarios imputables a la mercancía	0,0924	17,56	3.934.398,00 €	27,90%
Tasas aplicables a la mercancía	0,0371	7,05	1.578.398,00 €	11,20%
Costes de estiba-desestiba	0,0554	10,52	2.356.000,00 €	16,70%
COSTES DE EXPLOTACIÓN DEL SERVICIO	0,23	19,95	9.821.781,00 €	70%
COSTES FIJOS DEL BUQUE	0,11	19,95	4.469.622,00 €	31,70%
Costes de amortización	0,05	8,91	1.995.000,00 €	14,20%
Costes financieros	0,01	2,23	500.622,00 €	3,60%
Costes de tripulación	0,01	2,25	504.000,00 €	3,60%
Costes del seguro del buque	0,01	2,81	630.000,00 €	4,50%
Costes de mantenimiento del buque	0,02	3,75	840.000,00 €	6%
COSTES VARIABLES DEL BUQUE	0,13	23,89	5.352.159,00 €	38%
Costes de combustible	0,12	22,76	5.097.294,00 €	36,20%
Costes de resto de consumibles	0,01	1,14	254.865,00 €	1,80%
COSTES TOTALES	0,33	19,98	14.085.095,00 €	100%

Tabla 4 Estructuras de costes del transporte marítimo (Gobierno de España. Ministerio de Fomento. Secretaría de Estado de Transportes., 2011)

Modelo de simulación para el análisis de grúas de explanada en una Terminal de Contenedores Portuaria

Analizando la tabla 4, se observa que los costes de tripulación solo suponen un 3,60 %. Esto comparado con el 27% que supone el coste de personal en el transporte terrestre, supone una gran diferencia a la hora de aumentar el precio que supone cada contenedor transportado. Por otro lado, se puede observar que de nuevo los costes de combustible suponen un porcentaje importante en el transporte marítimo, el 36,20%. Este dato puede parecer que los costes de combustible por carretera, el 33% del total, sean parecidos. Sin embargo, el transporte marítimo permite el movimiento de gran cantidad de contenedores, al contrario que el transporte por carretera, que suele transportar uno a uno. Aunque el transporte marítimo no tiene la flexibilidad que tiene el transporte por carretera, el coste de combustible por contenedor siga siendo muy inferior en el transporte marítimo que en el de carretera, lo cual, debido a la gran importancia que supone el combustible en para el coste final, convierte el transporte en buques en una de las mejores opciones a la hora de transportar mercancías.

Finalmente, el coste total del transporte marítimo (costes por el uso de la infraestructura más costes de explotación del servicio marítimo) para una línea TMCD con las características establecidas en el presente estudio, puede estimarse en 14 M€/año y un coste unitario medio de 0,33 €/km por unidad transportada. Estos costes no incluyen los costes indirectos de estructura y comercialización de la naviera. Además, estos costes comparados con los costes por transporte terrestre, como se puede observar en la tabla 3, son inferiores. En el transporte terrestre, el coste directo bajo las hipótesis mencionadas de un vehículo portacontenedor asciende a 1,239 €/km cargado o bien 1,053 €/Km recorrido. Claramente el transporte marítimo proporciona una gran ventaja en término de costes con respecto al transporte terrestre por contenedor transportado.

En conclusión, aunque los datos no son a nivel mundial y pueden variar dependiendo del escenario, el coste del transporte marítimo de mercancías supone 0,33 €/km, un coste unitario algo menor que el obtenido para el transporte por ferrocarril (0,49 €/Km.) y bastante inferior al de carretera (1,05€/Km.) Estos resultados reflejan la importancia del transporte marítimo en el mercado internacional.

Como dato extra, están los costes externos unitarios que suponen cada uno de los medios de transporte. Los costes externos son aquellos que suponen un coste para la sociedad y de los que el usuario que los provoca no se encarga directamente. Estos costes son reales aunque no tengan un valor explícito de mercado. Algunos de esos costes, como se muestra en la tabla 5, son la contaminación atmosférica, el ruido, el cambio climático, gestión de infraestructuras etc.

Costes externos unitarios (€/1000 Ton-km)	Ferrocarril	Avión	Camión	Barco
Accidentes	0	0	7,8	0
Ruido	3,3	8,7	7,6	0
Contaminación atmosférica	8,6	15,2	44,1	14,1
Cambio climático	3,3	229,6	17,4	4,3
Naturaleza y paisaje	0,3	3,7	3	0,8
Procesos aguas arriba y aguas abajo	2,5	7,2	9,1	3,3
Costes adicionales en zonas urbanas	0,5	0	1,5	0
Costes marginales de congestión				
Congestión urbana			30,9	
Congestión interurbana			39,9	
Total (sin considerar coste de congestión)	18,5	264,4	90,5	22,5

Tabla 5 Comparativa costes externos unitarios (Gobierno de España. Ministerio de Fomento. Secretaría de Estado de Transportes., 2011)

Observando los costes finales, el Barco, una vez más, supone un gasto bastante inferior al del transporte terrestre (Camión y ferrocarril), los transportes más significativos en el comercio de mercancías. Esto se debe, como se puede observar, a sus bajos valores de contaminación climática y atmosférica por unidad transportada. Un factor determinante que hace que se coloque por delante del ferrocarril, es que es una baja fuente de ruido. En el caso contrario, se encuentra el avión, que su alta contaminación por contenedor transportador y su altas consecuencias en el cambio climático, lo coloca como el transporte con mayor coste externo de los cuatro, seguido por el transporte mediante camión.

2. Impacto medioambiental del transporte marítimo

Debido al creciente reconocimiento a la sostenibilidad del medio ambiente como un factor importante para el transporte, este sector está experimentando una mayor presión para adaptarse a las nuevas exigencias políticas medioambientales. Estos últimos años, el transporte, está atrayendo especial atención debido al rápido crecimiento que está experimentando. Este factor junto a que existe una elevada dependencia por parte del transporte al petróleo para el crecimiento de este sector, está aumentando la preocupación en temas medioambientales.

El sector del transporte, incluido el transporte de carga, está experimentando una rápida evolución. Se estima que en las próximas cuatro décadas, los flujos de carga mundial seguirán aumentando hasta llegar a alcanzar un nivel tres a cuatro veces los niveles de 2010. (Junta de Comercio y Desarrollo, 2013)

Otro dato importante, es que el sector del transporte consume más del 50% de los combustibles fósiles líquidos mundiales y estos aumentarán hasta un 45% entre 2008 y 2035. Además, las emisiones de dióxido de carbono por parte de este sector en 2010 supusieron el 22% de las emisiones mundiales y aumentará hasta un 57% entre 2005 y 2035. (Gobierno de España. Ministerio de Fomento. Secretaría de Estado de Transportes., 2011)

Al observar estos datos, se puede apreciar que conseguir un transporte más sostenible es un objetivo clave en la evolución de este sector para alcanzar un crecimiento sostenible en el futuro. Por lo tanto, la sostenibilidad en el transporte de carga supone que este sector pueda proporcionar sistemas de transporte eficientes en combustible, que supongan un coste más bajo por contenedor transportado, que sean más respetables con el medio ambiente reduciendo el consumo de combustibles fósiles y las emisiones de dióxido de carbono, y que sean resistentes al clima.

La industria, los países y la comunidad internacional, están realizando grandes esfuerzos para cumplir estos objetivos con medidas, técnicas y operativas aprobadas.

Las medidas que se tratan de incorporar tratan de abordar tres aspectos. Primero, evitar el transporte de carga y las operaciones ineficientes, como viajes vacíos, y tratar de utilizar transportes menos contaminantes como el ferrocarril y el transporte acuático. Segundo, alcanzar un cambio hacia fuentes y tecnologías más limpias y hacia tamaños de vehículos, cargas y rutas apropiados. Y tercero, mejorar la infraestructura, la logística y las operaciones relacionadas con el transporte.

Algunas medidas y técnicas que se aplican para mejorar en estos aspectos y hacer frente a los impactos previstos sobre el medio ambiente son las siguientes:

- Remodelación de la estructura de transporte y redes.
- Optimización de las cadenas de suministro multimodales.
- Equilibrio de los modos de transporte.
- Utilización de fuentes de energía limpias.
- Construcción y adaptación de infraestructuras con bajas emisiones de carbono.
- Apoyo a la información y las comunicaciones
- Nuevas tecnologías para mejorar la eficiencia energética.
- Aumento de capacidad de los sistemas de transporte.

La Organización Marítima Internacional (OMI) estimó que sin políticas de control mundiales y teniendo en cuenta el crecimiento del comercio marítimo mundial, las emisiones de carbono por los buques aumentarían entre un 200 a un 300% entre 2007 y 2050.

Los objetivos marcados son complicados debido a la gran cantidad de recursos utilizados que exige el gran crecimiento que está experimentando el transporte marítimo. Sin embargo, un factor importante es que el consumo de petróleo y emisión de dióxido de carbono por contenedor generado por transporte marítimo es muy inferior a los realizados por camiones o aviones. Este hecho coloca a los buques como una de las principales opciones a la hora de transportar mercancías, recalcando la importancia de los puertos a nivel mundial. En la figura 4 se muestra una comparación de las emisiones de CO₂ generadas por tonelada transportada por los distintos medios de transporte. Se puede observar claramente en la figura 4 que el transporte de contenedores en buque es el que menos gramos de CO₂ genera por tonelada transportada, 3 gramos por tonelada. En el otro extremo, se encuentra el transporte por avión que supone 560 gramos por tonelada transportada. En el caso del transporte terrestre, el consumo de CO₂ en gramos es de 15 veces superior al del buque, por tonelada transportada.

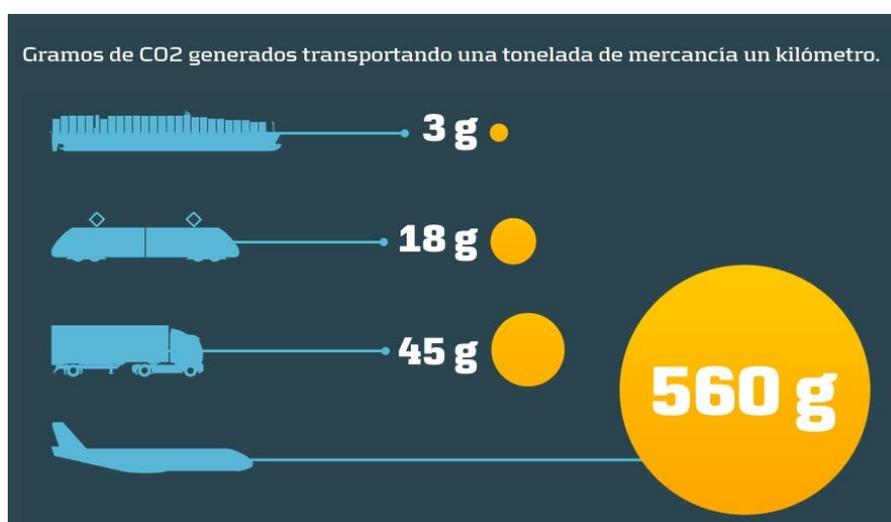


Figura 4 Gramos de CO₂ generados por tonelada transportada y por kilómetro (Oliveira, 2013)

Datos recogidos sobre el transporte intermodal terrestre y marítimo en 2011 por el ministerio de fomento de España muestran los resultados acerca del modo de transporte utilizado en el transporte de mercancías representados en los gráficos 3 y 4. Claramente el transporte por carretera es el medio de transporte más utilizado dentro de la Unión Europea con un 46%. El transporte marítimo también tiene una gran importancia como se puede observar, suponiendo un 37% el porcentaje de veces que se utiliza para el transporte de mercancías dentro de la Unión Europea. Sin embargo, el transporte por ferrocarril es un medio de transporte poco utilizado a la hora de mover mercancías dentro de la Unión Europea, sólo un 11%. Más adelante se verá el porqué de este bajo uso por parte de la Unión Europea del transporte de mercancías por vía férrea. Finalmente, el transporte aéreo supone una parte despreciable en el transporte de mercancías. Esto se debe a su alto consumo de combustibles y especialmente al alto coste que supone transporte mercancías vía aérea.

También se puede observar en el gráfico 3, que dentro de la Unión Europea se utilizan otras formas de transportar mercancías como son el transporte fluvial o el transporte por tubería. Sin embargo, sus bajos porcentajes, 5% y 6%, quedan eclipsados por la alta utilización del transporte por carretera.

% de tn-km transportadas según modo de transporte en la UE-27 (transporte interior) Año 2008

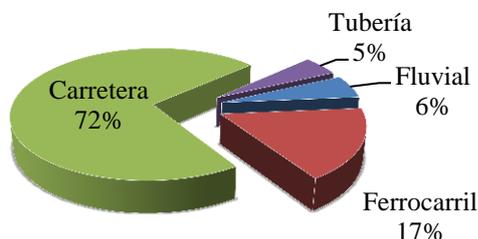


Gráfico 3 Modo de transporte utilizado en la UE (Gobierno de España. Ministerio de Fomento. Secretaría de Estado de Transportes., 2011)

% de tn-km transportadas según modo de transporte en la UE-27 (transporte interior todos los modos) Año 2008

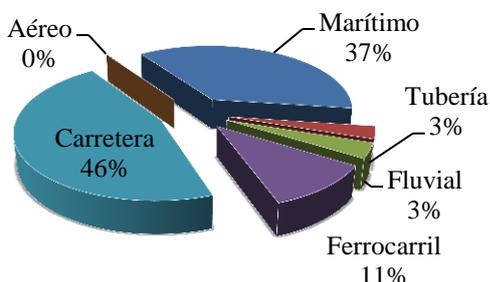


Gráfico 4 Modo de transporte utilizado en la UE (Gobierno de España. Ministerio de Fomento. Secretaría de Estado de Transportes., 2011)

En el gráfico 5, se muestra el consumo energético, a través de porcentajes, según el medio de transporte utilizado. Como se observa, el consumo energético por carretera supone la inmensa mayoría del consumo energético dentro de los diferentes modos de transporte. Esto se debe a su alto consumo por contenedor transportado y especialmente por el alto volumen de carga transportada por este medio dentro de la Unión Europea. El transporte aéreo es el siguiente que representa el mayor consumo energético. A pesar del bajo uso de este medio de transporte, debido a su alto volumen de consumo por carga transportada, lo coloca en la segunda posición en temas de consumo. Por último, el transporte por ferrocarril y el marítimo suponen una mínima parte del consumo energético en transporte de mercancías. Esto demuestra el bajo consumo por carga transportada que requieren estos dos medios de transporte. Este hecho se analizará a continuación junto con las tablas 6 y 7.

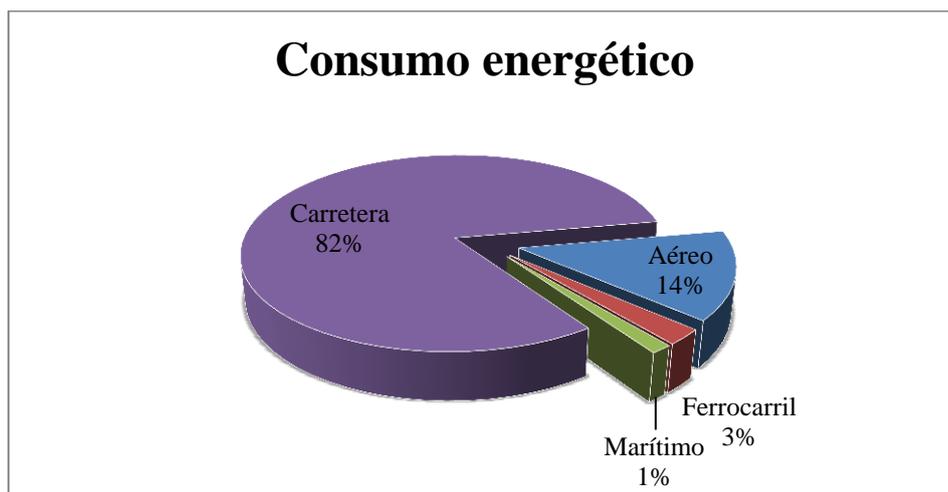


Gráfico 5 Consumo energético según el modo de transporte utilizado (Gobierno de España. Ministerio de Fomento. Secretaría de Estado de Transportes., 2011)

En la tabla 6 se presentan algunos datos de consumo energético para diferentes modos de transporte referente al transporte de mercancías. El consumo más bajo se encuentra en el transporte marítimo seguido del transporte por ferrocarril. Por otro lado, el consumo por tonelada transportada en transporte terrestre es muy superior, llegando a ser 11 veces superior en camiones pesados y más de 100 veces superior en furgonetas, comparado con el transporte marítimo. Este hecho, explica el alto porcentaje en consumo energético que supone el combustible en el transporte terrestre, como se explicó en la tabla 3 en la sección 1. Además, estos altos consumos, suponen una gran contaminación atmosférica a la hora de utilizar el transporte terrestre, ya que se necesita un camión por contenedor transportado.

Unidades: MJ/ton-km	Consumo
Marítimo de cabotaje	0,3
Ferrocarril	0,5
Camiones pesados articulados	1,4
Camiones pesados rígidos	3,5
Furgonetas	32
Avión, vuelos internacionales	24,1
Avión, vuelos nacionales	34,1

Tabla 6 Consumo energético para distintos modos de transporte (Gobierno de España. Ministerio de Fomento. Secretaría de Estado de Transportes., 2011)

La tabla 7 muestra las emisiones de dióxido de carbono recogidos en España. Como se puede observar, el avión es el que más consume con una gran diferencia respecto a los otros medios de transporte. El transporte por carretera también supone un importante consumo, especialmente si se tiene en cuenta el alto volumen de mercancías que se transporta con este medio. En el caso del ferrocarril, tubería y barco nacional, el consumo es muy inferior comparado con los otros dos medios de transporte.

Unidades: g CO ₂ /ton-km	Emisiones
Carretera	136,3
Ferrocarril	28,8
Avión nacional	2181,8
Barco nacional	18,6
Tubería	20,4

Tabla 7 Emisiones de GEI del transporte de mercancías en el Año 2007 (Gobierno de España. Ministerio de Fomento. Secretaría de Estado de Transportes., 2011)

Como se puede observar en los gráficos 3, 4 y 5 y en las tablas 6 y 7, la mayor parte de las emisiones generadas se realizan mediante el transporte terrestre mientras que en el transporte marítimo es mucho inferior, en términos de contenedor transportado. Este hecho resalta la importancia del transporte marítimo a la hora de mover mercancías. Es por ello, que a la hora de elegir un transporte, el transporte marítimo resulta más atractivo en términos medioambientales y de consumo energético.

En la UE-27, la energía final consumida para transporte, ascendió a 377.249 ktep (Kilo Tonelada Equivalente de Petróleo) en 2007. De este consumo total, el 82% correspondió a transporte por carretera, el 2,5% al transporte por ferrocarril, el 14,2% al transporte aéreo y el 1,4% a la navegación interior. Por modos de transporte en Alemania, Francia, Italia y España la participación del transporte por carretera en el total consumido para el sector del transporte alcanzó el 67%. (Gobierno de España. Ministerio de Fomento. Secretaría de Estado de Transportes., 2011). En la figura 5 se reflejan estos datos sobre el consumo de energía por medio de transporte. Se observa, que el transporte por carretera, representado por el color morado, es claramente el más utilizado en todos los países de la Unión Europea.

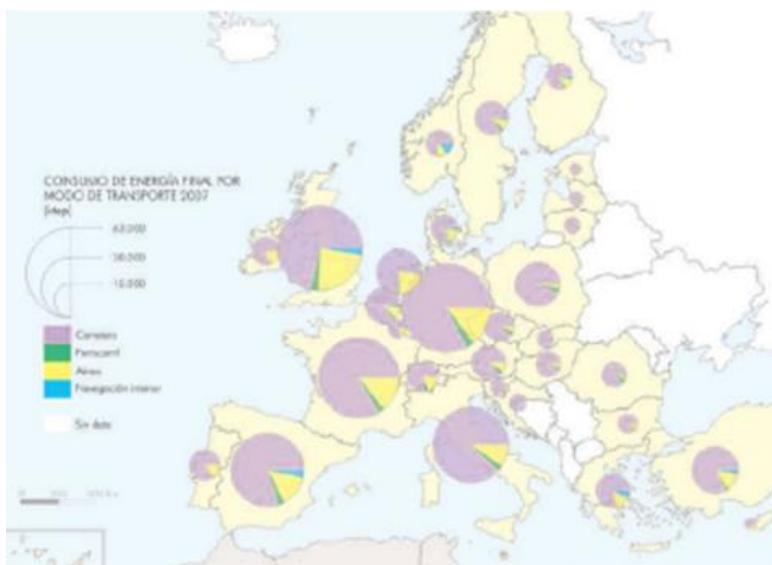


Figura 5 Consumo de energía final por medio de transporte en la UE-27. Año 2007 (Gobierno de España. Ministerio de Fomento. Secretaría de Estado de Transportes., 2011)

Así pues, el transporte por carretera sigue siendo el modo de energía que más consume (88,9% de la energía total consumida en el transporte, excluyendo el transporte aéreo y marítimo internacional), aunque el mayor crecimiento de los últimos años corresponde al transporte marítimo.

El gráfico 6 muestra los costes directos del transporte por carretera. Entre ellos, se pueden encontrar el coste por personal de conducción, el coste por combustible, el coste por dietas los costes de mantenimiento, o los de amortización del vehículo. Como muestra el gráfico 6, el combustible corresponde al mayor gasto para el transporte terrestre, el 33%, sólo comparable con los costes por personal de conducción, un 28%. Este hecho junto a su alto uso en la cadena de transporte a nivel mundial, y que los contenedores generalmente se transportan uno a uno, cuando se transportan por carretera, supone un daño muy preocupante al medio ambiente por cada contenedor que es transportado.

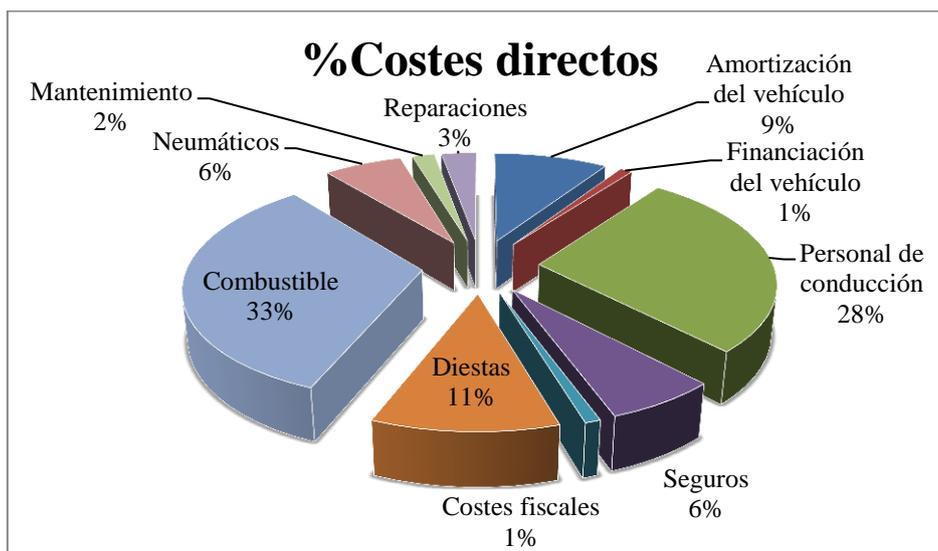


Gráfico 6 Costes directos de vehículos articulados portacontenedores a 31 de octubre de 2010 (Gobierno de España. Ministerio de Fomento. Secretaría de Estado de Transportes., 2011)

La ventaja que proporcionan los buques en términos de consumo de combustible está siendo aprovechada por parte de las empresas navieras de transporte. Desde que en el siglo XX, en los años cincuenta, apareciera el contenedor y se llevara a cabo el primer viaje de un buque portacontenedores, el crecimiento de esta forma de transporte ha sido imparable. En la actualidad, se fabrican buques portacontenedores para la naviera Maersk de 400 metros de eslora, capaces de transportar 18000 TEUs. En capítulos posteriores se hablará en profundidad de estos buques.

Las dimensiones masivas de este tipo de buques permiten un menor consumo por contenedor que cualquier medio de transporte. Esto se consigue viajando a bajas velocidades que reducen el consumo. Además, en términos de eficiencia energética y economías de escala, son fundamentales debido al bajo consumo en comparación con la carga transportada. Todos estos factores colocan al transporte marítimo en una posición ventajosa para ser elegida como uno de los transportes prioritarios a la hora de transportar contenedores.

3. Sistema intermodal del transporte.

El transporte ha evolucionado en los últimos años, y cómo se ha explicado anteriormente, la evolución de la economía mundial está influyendo en los cambios de flujo mundial. A continuación, se explicará brevemente el estado actual de los distintos modos de transporte en la unión Europea.

3.1. Transporte por Carretera

Durante las últimas décadas, el transporte por carretera de mercancías ha ido aumentando sin detenerse. El uso de este modo de transporte tiene como consecuencia el aumento de la congestión de carreteras, de los accidentes y emisiones de CO₂. Aunque, como se explicó anteriormente, sus costes son superiores a los de otros modos de transporte como el marítimo y el ferrocarril y a sus altas emisiones por contenedor transportado, este modo de transporte sigue siendo una pieza clave para el transporte de mercancías. Este hecho se debe a su naturaleza más flexible, siendo el único modo de transporte que puede llevar envíos puerta a puerta. Es un tipo de transporte ideal para trayectos cortos. En este ámbito no existe ningún otro modo de transporte alternativo lo suficientemente adaptado a las necesidades de la economía. La imagen 1 es la de un camión transportando un contenedor de 40 pies de la empresa MAERSK. Como se puede observar, los contenedores se transportan uno a uno, utilizando un camión por cada contenedor. A pesar de que permite enviar la mercancía directamente al cliente, las consecuencias medio ambientales son gravísimas, a la vez que se aumenta el consumo de combustible por cada contenedor.



Imagen 1: Camión en el Puerto de Algeciras (APM Terminals)

Estas afirmaciones junto a que en la actualidad, la confiabilidad del servicio ha llegado a ser más importante que los costes en algunos casos, colocan al transporte de carretera como un modo de transporte insustituible. (Carrasquilla, 2008/2009) Es más, sin un sistema de transporte

por carretera eficaz y dinámico no se pueden armonizar los otros modos correctamente y desarrollar soluciones intermodales en toda Europa, puesto que la mayoría de los desplazamientos empiezan y terminan por carretera.

3.2. Transporte por Ferrocarril

Dentro de la Unión Europea, uno de los modos de transporte más débiles es el ferrocarril. Mientras que en el transporte de pasajeros existe una buena acogida, en el transporte de mercancías los servicios siguen obsoletos, lentos y moviéndose por líneas saturadas. Esta debilidad por parte del transporte por ferrocarril favorece al transporte de mercancías por carretera. (Carrasquilla, 2008/2009). La imagen 2 es la de un tren de mercancías por la línea Barcelona-Cerhère. Aunque dentro de Europa el transporte de mercancías por ferrocarril es bastante bajo, como se explicará a continuación, este es uno de los ejemplos que se puede encontrar.



Imagen 2: Tren de transporte de mercancías por la línea Barcelona-Granollers-Girona-Portbon-Cerbère (Ferropedia, 2014)

Los principales inconvenientes del transporte de ferrocarril que hacen que este se posiciones como uno de los menos utilizados en la Unión Europea son los siguientes:

- El ancho de vía es uno de los obstáculos principales para comunicación ferroviaria en Europa. Este punto débil provoca grandes retrasos, rompiendo la continuidad, y haciéndolo más costoso.
- Otro punto débil es que el transporte de pasajeros tiene prioridad frente al transporte de mercancías. De hecho existen pocas vías dedicadas al transporte de mercancías.
- Falta de competitividad en el sector.
- Baja fiabilidad internacional del ferrocarril. Fiabilidad dudosa de un servicio que no responde de forma satisfactoria a las expectativas de los clientes.
- El ferrocarril no puede hacer el último recorrido. No es un medio de transporte flexible.

En la figura 6 se muestra las interconexiones por vía que existen dentro de la Unión Europea. Se puede observar que España tiene un bajo número de interconexiones por vía, como ocurre en el caso de Gran Bretaña e Italia. Sólo en caso de Alemania o Francia se puede encontrar una cantidad importante de interconexiones por medio de vías para el transporte de mercancías. Este hecho refleja la baja utilización del ferrocarril a la hora de transportar mercancías dentro de la Unión Europea.



Figura 6 Red de transporte ferroviario en Europa (Carrasquilla, 2008/2009)

A pesar de estos inconvenientes, existen una serie de ventajas y de oportunidades que dan esperanza al crecimiento de este modo de transporte:

- El ferrocarril es visto como un modo de transporte seguro.
- Existe conexión de ferrocarril en la mayoría de puertos.
- Desarrollo de terminales intermodales con algunas buenas prácticas en materia de logística.
- Los consumidores son cada vez más conscientes de los problemas ambientales.
- Voluntad política por reducir el transporte por carretera para disminuir el gasto energético, garantizar un transporte más limpio y seguro, y disminuir el tráfico en carreteras para disminuir el número de accidentes.
- Permitiría el transporte de mercancías peligrosas fuera de las carreteras.
- Mejoras en el rastreo de la información.

3.3. Transporte Aéreo

De todos los medios de transporte el transporte aéreo, es el que presenta un mayor crecimiento dentro de Europa tanto en el transporte de pasajeros como en de mercancías. Aunque comparado con el alto volumen de toneladas manejadas en transporte marítimo los volúmenes de carga y transporte de correo por aire son obviamente bajos, los datos estadísticos muestran un crecimiento importante del transporte aéreo en la Unión Europea. (Carrasquilla, 2008/2009) La imagen 3 es un ejemplo de cómo se utiliza el transporte aéreo de mercancías dentro de España. En este caso comunicando Lanzarote con el exterior. Además, aunque los volúmenes son pequeños comparados a otros modos de transporte, el valor medio de una tonelada de mercancías aéreas es casi siempre mucho más alto que en otros modos de transporte. Por lo general de 10 veces más. (Gobierno de España. Ministerio de Fomento. Secretaría de Estado de Transportes., 2011)



Imagen 3: Transporte Aéreo de Mercancías (Lanzarote, 2013)

Sin embargo, a pesar de este crecimiento, existen una serie de inconvenientes que provocan que este modo de transporte no sea el más elegido:

- La gestión del tráfico aéreo en Europa se caracteriza por una gran fragmentación. El proceso de toma de decisiones a nivel intergubernamental puede ser lento e ineficaz generando grandes costos, retrasos en la cadena de suministros. Además esta fragmentación retrasa la introducción de nuevas tecnologías y procedimientos, y reduce las mejoras de eficiencia que se podrían conseguir. Impide el desarrollo de economías de escala y sistemas normalizados.
- Alto consumo de combustible que como consecuencia tiene graves consecuencias medioambientales.
- Su flexibilidad es claramente menor que el transporte por carretera, lo que obliga una vez más a utilizar dicho transporte en la cadena de suministros.
- El incremento del tráfico aéreo alarga la duración de los vuelos innecesariamente con el consiguiente impacto ambiental.
- Se ha excedido la capacidad aeroportuaria instalada generando retrasos, grandes costos en la cadena de suministros, poniendo en riesgo muchas veces la seguridad de las naves, infraestructuras y vidas de las personas.
- A pesar de los progresos tecnológicos de la aviación en general, el control de tránsito aéreo sigue siendo fundamentalmente artesanal.

- El transporte aéreo tiene una alta contaminación acústica que provoca problemas en sus alrededores creando controversia. Esto ha obligado a reducir los vuelos nocturnos o se han puesto tasas relacionadas por el nivel de ruido a pagar por parte de las compañías aéreas.

3.4. Transporte Marítimo

El transporte marítimo es vital para la fortaleza y el crecimiento económico de Europa y el mundo entero. Europa con uno de los puertos más importantes del mundo, el puerto de Rotterdam, mueve una gran cantidad de mercancía que aumenta cada año. Como se mencionó anteriormente, en los últimos años, el tráfico mundial ha pasado de 2600 a 8400 millones de toneladas en apenas 40 años. El número de contenedores ha aumentado pasando desde algo más de 516 millones de contenedores en 2008 a más de 600 millones en 2012. (Junta de Comercio y Desarrollo, 2013)



Imagen 4: Buque de transporte de Contenedores Puerto Algeciras (APM Terminals)

Desde que la carga se maneja en contenedores, la industria naviera ha revolucionado. La contenedorización es un factor de crecimiento, puesto que las principales compañías logísticas y navieras se han centrado en la potenciación del tráfico de contenedores, que puede ser manejado rápidamente en los grandes puertos. La imagen 4 muestra un buque dentro de la terminal APM en el Puerto de Algeciras. Como se puede observar, el puerto está adaptado para la carga y descarga de contenedores y para albergar buques de grandes dimensiones.

Dos terceras partes de las mercancías manipuladas fueron mercancías descargadas. Casi todos los miembros de la Unión Europea descargan más mercancías de la que carga. Es decir, que se importa más de lo que se exporta. Es por ello que dentro de la Unión Europea, existe la esperanza de que la navegación pueda convertirse en una alternativa verdadera del transporte terrestre con las “autopistas del mar”. (Carrasquilla, 2008/2009)

Además, el transporte marítimo consume únicamente una décima parte del combustible por tonelada-milla que precisa el transporte terrestre. Es por ello, que el tráfico de largas distancias está dominado por este medio de transporte.

Sin embargo, el medio de transporte marítimo debe seguir evolucionando. Debido a la deslocalización de los procesos productivos, la demanda exigente y cambiante, los avances tecnológicos obligan a una transformación global en las políticas y prácticas de los transportes

marítimos y portuarios a nivel global. Se busca la colaboración a gran escala entre los miembros de la Unión Europea y otros países para obtener una mejor fluidez de las actividades en el proceso de transporte.

A parte del calado, los servicios y la capacidad del puerto, el hinterland (conexiones terrestres) es un aspecto significativo del puerto ya que estas conexiones son vitales para el flujo continuo de mercancía. El ferrocarril debe estar muy presente en este proceso, ya que sus ventajas en costos para cargas de grandes volúmenes y largas distancias (mayor de 500km) fortalecen la competencia de los puertos. Además, esta combinación de modos de transporte, ferrocarril y marítimo, se ve reforzada por la Unión Europea que busca disminuir el uso del transporte por carretera. Sin embargo, las compañías navieras encuentran el gran obstáculo de la carencia de una red intermodal de ferrocarril en el continente europea para desarrollar esta estrategia.

3.5. Sistema Intermodal del transporte

Una vez explicado el estado actual de los diferentes modos de transporte, el siguiente paso lógico es ver como se podrían combinar para mejorar la eficiencia en el transporte de mercancías. Es aquí donde entra la intermodalidad.

El transporte de mercancías es uno de los sectores más importantes dentro de la Unión Europea. Como se ha mencionado anteriormente, su crecimiento en los últimos años ha incluso superado el crecimiento del PIB. (Secretaría de la UNCTAD, 2012). El transporte de carretera ha sido el que ha experimentado mayor crecimiento como consecuencia de este aumento del transporte de mercancías. Sin embargo, aspectos como la polución, la congestión y la accidentalidad han aumentado como consecuencia. La Unión Europea ha señalado a la intermodalidad como la alternativa. El hecho que los puertos sean un punto clave en el transporte intermodal, hace que los puertos adquieran un papel cada vez más importantes en nuestra sociedad.

3.5.1. Concepto de intermodalidad

Según el Ministerio de Fomento se define el transporte intermodal como el movimiento de mercancías en una unidad o vehículo usando sucesivamente dos o más modos de transporte sin manipular la mercancía en los intercambios de modo. Por extensión, se ha usado el término intermodalidad para describir un sistema de transporte de un envío de mercancías de forma integrada, sin procesos de carga y descarga, en una cadena de transporte puerta a puerta.

La unidad de transporte intermodal es el contenedor, caja móvil o semirremolque adecuado para el transporte intermodal.

Como define Enelis Palma C., (Carrasquilla, 2008/2009) la intermodalidad es un elemento fundamental para garantizar el uso racional de los modos de transporte disponibles consistiendo en la integración operativa y de gestión de las diferentes modalidades de transporte.

3.5.2. Infraestructura del transporte intermodal. Clasificación y funciones

Nodo Central o Hub

El nodo central/estación nodal constituye el punto central para la recogida, clasificación, transbordo y redistribución de mercancías en una zona geográfica determinada. El puerto hub es aquel puerto oceánico que aglutina una gran cantidad de contenedores, unos para ser distribuidos a su zona de influencia terrestre (hinterland), y otros para su posterior distribución mediante buques oceánicos a los puertos de destino final. También se le suele llamar puerto de transbordo, que suelen ser los más grandes y distribuidores de servicios feeder (servicios de enlace de media y corta distancia). En este tipo de puertos, tipo hub, se encuentra el puerto de Algeciras.

Un puerto hub tiene aspectos fundamentales como una situación geográfica privilegiada; la existencia de mercado y de servicios que lo puedan satisfacer (hinterland); multimodalidad nacional e internacional; economías de escala, que supone el transporte de mercancías de buques madre a buques feeder para distribuir las cargas. Además, los puertos hubs deben tener una alta calidad y rapidez en los servicios con unos costes competitivos.

Una vez definido el concepto de nodo central o hub, se debe entender que un sistema de infraestructuras para el transporte deberá enlazar estos nodos entre sí utilizando las diferentes plataformas logísticas a través de diferentes modos de transporte: marítimo ó fluvial, ferroviario, carretera y aéreo. Esto es lo que se conoce como modelo radial. Se construye una topología mallada que proporcione alternativas fiables y eficientes a los diferentes enlaces entre nodos.

Plataformas logísticas

Las plataformas logísticas son los puntos o áreas de las cadenas de transporte y logística en los que se concentran actividades y funciones técnicas y de valor añadido como son la carga y descarga, el intercambio modal, el etiquetado, la paletización, el picking, el almacenamiento etc.

Además una plataforma logística se caracteriza por ser una zona delimitada en el interior de la cual se ejercen todas las actividades relativas al transporte, a la logística y a la distribución de mercancías, tanto para el tránsito nacional como el internacional. Una plataforma de ve estar dotada de todos los equipamientos colectivos necesarios para el buen funcionamiento de las actividades a realizar y comprender servicios comunes para las personas y para los vehículos de los usuarios.

Zona de actividades logísticas portuarias (ZAL)

Una vez se ha introducido lo que es una plataforma logística, se abordarán aquellas más relacionadas con los puertos, ya que es el tema en el que se centra este documento.

Las zonas de actividades logísticas portuarias son plataformas logísticas vinculadas a puertos que albergan actividades logísticas generalmente dedicadas a mercancías marítimas. Su implantación es necesaria para responder a las necesidades de manipulación de mercancías que viene desde el hinterland o se dirigen a él. Mientras los puertos son lugares donde se realizan funciones de valor añadido, con rupturas modales y concentraciones de tráfico, las ZAL surgen como respuesta por parte de los puertos al rediseño de las redes de distribución europeas. Las ZAL para ser competitivas deben de disponer de condiciones óptimas de régimen y servicios aduaneros, ya que son plataformas logísticas especializadas en tráfico, principalmente de exportación e importación.

Para cumplir con estas necesidades de competitividad, existen tres alternativas para las ZALs para la instalación y almacenamiento de mercancías con anticipación a la entrada aduanera de las misma:

- a. **Zona Franca:** es una zona delimitada dentro del territorio nacional, en la cual las mercancías que se introducen se consideran fuera del territorio aduanero nacional, y por lo tanto, las mercancías no están sometidas al control habitual de la aduana.
 - Deben ser autorizadas por los países de la Unión Europea.
 - Las mercancías pueden estar un tiempo limitado en ellas
 - Es una zona clave para empresas que quieran exportar o importar mercancías, o que se dediquen directamente al comercio internacional.
 - Las zonas francas son una ventaja tanto si se realizan transacciones entre países de la Unión Europea y otros países no comunitarios, como si se realizan entre países no comunitarios.

- b. **Depósito franco:** local cerrado dentro del territorio nacional y autorizado por el Estado. En un depósito franco no se considera que las mercancías en el territorio aduanero para la aplicación de derechos aduaneros y tributos de importación.

- c. **Depósitos aduaneros:** locales para almacenar mercancías solicitadas al régimen de depósito (régimen fiscal) y que más tarde serán destinadas a otras operaciones aduaneras. Pueden ser públicos o privados, y el tiempo máximo de estancia de la mercancía en estos almacenes es de cinco años.

Puerto seco

Dentro de las plataformas logísticas, cabe mencionar los puertos secos. Un puerto seco es una terminal intermodal de mercancías situada en el interior de un país y que dispone de un enlace directo con un puerto marítimo. Suele constar de un área intermodal donde se combinan el transporte por carretera y el transporte por ferrocarril.

Un ejemplo de puerto seco se encuentra en Madrid el cuál está habilitado como un recinto interior aduanero marítimo lo que lo convierte en una prologación del puerto marítimo. En general, las mercancías suele llegar a través de ferrocarril desde puertos como el de Algeciras, Bilbao, Valencia o Barcelona, y se suelen aplicar una serie de procedimientos y trámites de la manera más ágil posible.

Terminal multimodal o Plataforma logística multimodal

Con esta denominación se conocen las plataformas logísticas con mayor complejidad funcional, pero en las que son claves las áreas intermodales carretera/ferrocarril. También pueden contar con áreas logísticas especializadas o monofuncionales. Suelen utilizarse en un rango nacional y a veces incluso regional.

En estas plataformas, se realiza el almacenamiento y transbordo de Unidades de Transporte Intermodal (UTIs). Es el espacio físico dónde las UTIs son transferidas de un modo a otro.

3.5.3. La intermodalidad como alternativa

Una vez definido el concepto de transporte intermodal, ahora se presentan los aspectos que hacen que este tipo de transporte sea tan importante y que se pueda convertir en una alternativa al transporte por carretera.

La política europea ha marcado un objetivo inequívoco: “La necesidad de un equilibrio de los diferentes modos de transporte para garantizar la movilidad, luchando contra la congestión y los efectos medioambientales, bajo los parámetros de seguridad y calidad exigidos por los ciudadanos”

Como se ha mencionado previamente, la UE trata de encontrar un transporte alternativo para paliar los efectos adversos del transporte terrestre y es aquí dónde el transporte intermodal se coloca como una opción firme para disminuir el transporte terrestre dentro de la Unión Europea. (Institute for Transport Studies, 2010)

Para entender el transporte intermodal y las ventajas se presenta un esquema en la figura 7. Aunque la infraestructura de carretera permita un envío directo de mercancías entre el cargador A y el destinatario B, el transporte carretera-marítimo permite otra alternativa dónde el contenedor sale del almacén del remitente hacia la estación intermodal A'. En la estación A', la carga es transferida sin ninguna manipulación a un buque. A partir de aquí, se inicia el trayecto marítimo hasta una estación B', donde la carga pasa desde el buque hasta un camión para que la mercancía llegue finalmente al destino B.

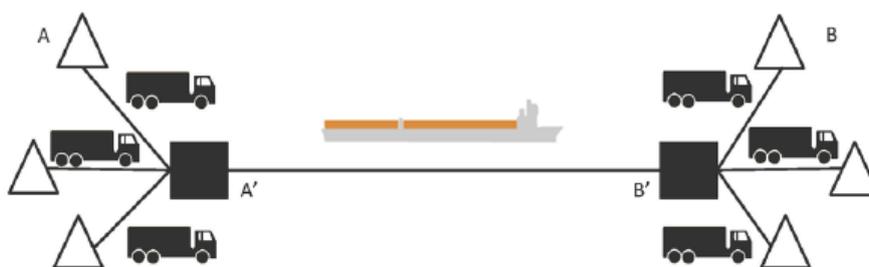


Figura 7 Esquema de transporte Intermodal

Como se comenta en (Alejandro Escudero, 2012), el objetivo del transporte intermodal es aprovechar la sinergia entre los modos de transporte involucrados. Por un lado, se usa un modo

de transporte con gran flexibilidad, usualmente carretera, que llevaría a cabo los trayectos inicial y final. La operativa de recogida y entrega del contenedor entre terminal y clientes finales suele definirse como remolcado, acarreo o drayage. Para el trayecto intermedio, line-haul, suelen usarse modos que presenten una mayor economía de escala, por ejemplo el ferroviario o marítimo. Este trayecto intermedio suele ser un porcentaje muy elevado de la distancia total recorrida en el envío.

4. Terminal de contenedores portuaria. Conceptos Básicos.

Una vez se ha recalcado la importancia de los puertos en el transporte de mercancías a nivel mundial, y antes de entrar en detalle en la explicación del funcionamiento de un puerto, se pasa a describir las figuras fundamentales que se encuentran en un puerto. En esta parte, se explica la evolución del contenedor y su papel clave en el transporte de mercancías, los tipos de grúas que se utilizan en un puerto y el concepto de buque, todos ellos fundamentales en las terminales de contenedores portuarias.

4.1. El contenedor y sus diferentes tipos

En la década de los 50 del siglo XX empezaron a usarse los primeros contenedores en Estados Unidos. El contenedor revolucionó la forma de transportar la mercancía. A partir de su invento, las mercancías viajarían “puerta a puerta” desde el remitente hasta el destinatario protegidas en un entorno cerrado y su carga y descarga serían mucho más fáciles y eficientes. (A.Oliveira, 2013)

Entre las ventajas que proporciona el uso de contenedores, las listadas a continuación son las más importantes:

- Reducción de los tiempos de carga y descarga
- Reducción de los controles e inspecciones al ir precintados.
- Reducción de las primas del seguro al evitar robos y daños.
- Reducción de costes al ser menores los tiempos de transporte.
- Simplificación documental.
- Mejora del seguimiento de la mercancía.

El inventor de este producto revolucionario fue un camionero de Carolina del Norte llamado Malcom McLean. McLean, pensó que tardaba mucho en cargar y descargar toda la mercancía de su camión una por una en el barco y se dio cuenta que podría cargar directamente el camión en el buque para ahorrar tiempo.

A partir de esa idea, desarrolló una caja metálica con dispositivos de izado para las grúas tanto de los muelles como de los buques, que le otorgaba la posibilidad de transportar en el remolque de su tráiler toda la mercancía de una manera más cómoda y eficiente.

Cuando los contenedores empezaron a introducirse en el mundo del transporte de mercancías, estos eran de diversas dimensiones, hasta que en la década de los sesenta se estableció la estandarización de las medidas, materiales y pesos de los contenedores. Estas características estandarizadas conllevaron a una mayor facilidad en el paso de la carga entre los medios de transporte (buques, camiones, ferrocarriles y aviones). Como consecuencia de esta contenerización, el movimiento de carga se generaliza creándose la intermodalidad en el transporte de mercancías.

En 1951, al observar los beneficios que aportaban los contenedores en términos económicos, de rapidez de maniobra y de seguridad a las líneas navieras, se inicia la especialización en la actividad. Esta especialización se traduce en la construcción de los primeros buques portacontenedores en Dinamarca, y la construcción de las primeras terminales especializadas. A partir de ese momento, las terminales estarían dotadas de la infraestructura y de los equipos necesarios para la operación con contenedores para la carga y descarga de los buques. Además, se introducirían enlaces de transferencia ferroviaria y carretera que propulsaran el transporte de mercancías. (A.Oliveira, 2013)

En 1965, la ISO (*International Standard Organization*) creó las normas para la estandarización de los contenedores, normalizando internacionalmente el contenedor en diseño, dimensiones, capacidad de carga, cubijaje, etc. Y lo definió así en la norma UNE 49-751 h1:

“Se entiende por contenedor, un instrumento de transporte que reúne las siguientes características:

- Especialmente concebido para facilitar el transporte de mercancías sin rotura de carga, por uno o varios modos de transporte
- Carácter permanente o suficientemente resistente para permitir su uso periódico.
- Dispone de dispositivos que permitan su manipulación, principalmente al tiempo de su transbordo de un medio de transporte a otro
- Ideado de manera que resulte fácil su carga y descarga
- Su volumen interior es de un metro cúbico como mínimo”

Junto con esta definición se establecieron los diferentes tipos de contenedores manejados y aceptados a nivel mundial de acuerdo a los propósitos o funcionalidades que tengan, entre los cuales tenemos:

- Estándar: usados para el transporte de cualquier mercancía seca normal (palets, bolsas, cajas...). (A.Oliveira, 2013) Un ejemplo de contenedor estándar se muestra en la figura 8.



Figura 8 Contenedor Estandar (A.Oliveira, 2013)

- Open top: tienen techo removible de lona. Se usan para el transporte de cargas pesadas o de grandes dimensiones y permiten la manipulación de su contenido desde arriba. (A.Oliveira, 2013) La figura 9 muestra un contenedor tipo open top, destacando con azul la parte superior del contenedor para reflejar que se puede manejar la carga desde arriba.



Figura 9 Contenedor Open top (A.Oliveira, 2013)

- Flat tracks: contenedores sin laterales, usados para cargas de grandes dimensiones. Este tipo de contenedor se muestra en la figura 10. (A.Oliveira, 2013) Al contrario del resto de contenedores, no tiene laterales como muestra la figura.



Figura 10 Contenedor Flat tracks (A.Oliveira, 2013)

- Refrigerado: tienen un equipo propio de generación de frío. Es necesario que estén conectados a una red trifásica tanto en el transporte como en el almacenaje. (A.Oliveira, 2013) La figura 11 es un ejemplo del contenedor refrigerado. Esta figura muestra como tiene una conexión en el lateral para poder conectar el contenedor a una red eléctrica y que así pueda cumplir sus funciones de refrigeración.



Figura 11 Contenedor Refrigerado (A.Oliveira, 2013)

- Tanques: usados para transportar líquidos o gases. (A.Oliveira, 2013) Este tipo de contenedor se muestra en la figura 12. El tanque está protegido por una estructura de metal, que además le da la forma y dimensiones del resto de contenedores para facilitar su transporte.



Figura 12 Tanques (A.Oliveira, 2013)

- Aislante: usados para transportar cargas que requieran temperaturas constantes. (A.Oliveira, 2013) La figura 13 muestra el contenedor aislante. Se diferencia de un contenedor estándar, simplemente, en el material aislante que lo compone.

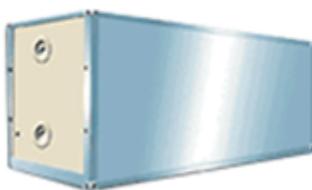


Figura 13 Contenedor Aislante (A.Oliveira, 2013)

En la siguiente tabla (tomada de la norma UNE 49750) se muestran las diferentes medidas en que se encuentran los contenedores. Para este trabajo, sólo se considerarán los contenedores de 20' y 40'.

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 8 Tamaño de contenedores (A.Oliveira, 2013)

4.2. Equipos de manipulación y transporte de contenedores en TCPs (Terminales de Contenedores Portuarias)

Una vez explicada la historia y la importancia de los contenedores en el transporte de mercancías, las distintas máquinas utilizadas en un puerto son las siguientes figuras críticas que se deben mencionar para comprender el funcionamiento de las terminales de contenedores portuarias.

Debido a las exigencias del mercado, los puertos deben contar con una serie de maquinaria cada vez más especializada para el cambio de modo de transporte que les permita cumplir con los requisitos de eficiencia de seguridad, rapidez y eficiencia, y así mejorar su rendimiento y estar

al nivel de la competencia. La nueva tendencia de realizar las operaciones cada vez de forma más automatizada en las TCP ha dado lugar a nuevas propuestas en maquinaria.

Seguidamente, se mencionarán y clasificarán los principales tipos de maquinaria más usados en las terminales de contenedores portuarias en función de su papel en el puerto, con una breve descripción de cada una de ellas.

4.2.1. Carga y Descarga de Buques

Grúas polivalentes

Las grúas polivalentes permiten manejar diferentes tipos de carga. Prácticamente han desaparecido de los grandes puertos, y sólo están presentes en puertos de países en desarrollo que no pueden hacer frente a las grandes inversiones que suponen un cambio a maquinaria más moderna. En la siguiente imagen se muestra una grúa polivalente trabajando en un muelle.



Imagen 5 Grúa polivalente (Puerto de Sevilla, 2014)

Grúas pórtico de muelle

Las grúas pórtico son el principal equipo de manipulación para realizar la carga y descarga de contenedores en las terminales portuarias. Son de gran importancia ya que son el único equipo de una terminal que puede realizar las operaciones para servir y descargar los buques. Según lo modernas que sean, pueden descargar entre 12 y 60 contenedores por hora. En la imagen 6 se muestra una grúa pórtico mientras realiza la carga-descarga de un buque.



Imagen 6 Grúa pórtico (Konecranes, 2014)

Las grúas pórtico de muelle han tenido que evolucionar durante los últimos tiempos para poder adaptarse a esta tendencia al gigantismo que se está presentando en los nuevos buques. En la figura 14 se muestra la evolución en cuanto a tamaño que han sufrido estas grúas desde que empezaran a usarse a principios de los años 70 hasta el año 2013. Como se observa en la figura, las grúas pórtico han ido evolucionando en los últimos años. En el año 2013, el primer triple E entró en funcionamiento y las terminales portuarias se vieron obligadas a recrecer sus grúas para adaptarse a las nuevas dimensiones del barco Triple E (*Mærsk Mc-Kinney Møller*, perteneciente a la naviera MAERSK).

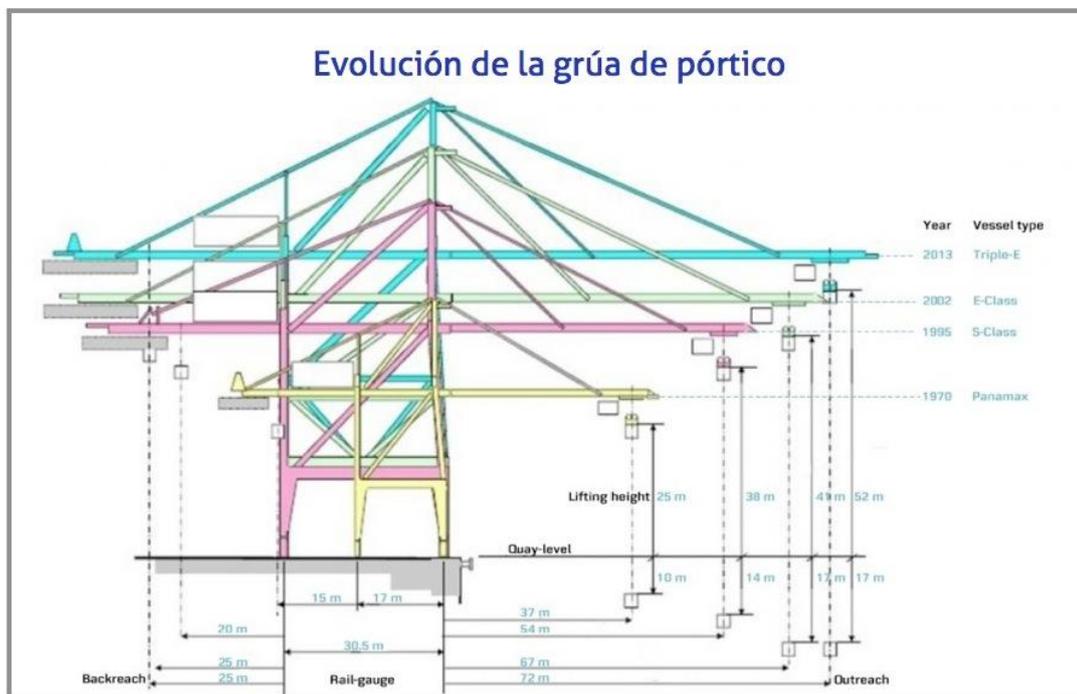


Figura 14 Evolución de las grúas pórtico (Cadena de suministro, 2010)

En la tabla 9 se muestra la evolución del tamaño de las grúas pórtico durante estos 40 años. La tabla muestra tanto las dimensiones como las capacidades de cada una de las grúas. Además, muestra los tiempos de translación dentro del puerto y como estos han ido evolucionando.

Tipo	Feeder	Panamax	Post-Panamax	Super Post-Panamax
Alcance delantero en contenedores	10	13	16	22
Altura Spreader	25	30,5	33	40
Distancia entre carriles	15,24	15,24	30,48	30,48
Capacidad bajo Spreader	Hasta 40 m	Hasta 50 m	Hasta 65 m	Hasta 65 m
Translación de pórtico	30 m/min	45 m/min	45 m/min	45 m/min
Spreader telescópico	20'/40'/45'	20'/40'/45'	20'/40'/45'	20'/40'/45'

Tabla 9 Evolución grúas

Recientemente, como resultado del aumento del flujo de contenedores a nivel mundial y una economía de escala, los buques de contenedores de gran tamaño son cada vez más populares. Como consecuencia, cada vez las terminales de contenedores compiten entre ellas para convertirse en puertos centrales, y de esta forma atraer a buques de contenedores de gran tamaño. Un claro ejemplo de esta pelea por conseguir atraer los nuevos grandes buques se puede observar en el puerto de Algeciras. En Noviembre de 2013, el puerto de Algeciras recibió el primer Triple-E. Este buque, el más grande del mundo en la actualidad, con capacidad para más de 18000 TEUs y con 398 metros de largo, llegó desde Asia atracando en las terminales APM de Algeciras quedándose durante 24 horas. Aparte de descargar contenedores, se comprobó que el puerto Juan Carlos I está en perfectas condiciones después del trabajo realizado debido al proyecto que recibe el nombre de “Algeciras 2014”. Este proyecto trata de preparar los muelles para albergar a esto mega buques invirtiendo más de 47 millones de euros. Esta inversión incluye la remodelación de cuatro de sus grúas pórtico aumentándolas de nivel para alcanzar una altura superior y la adquisición desde Asia de otras cuatro grúas que sean capaces de trabajar con los nuevos Triple-E y así hacerse con una importante parte del flujo de contenedores mundial.

En la imagen 7 se puede apreciar el recrecido realizado en la parte inferior de la grúa.



Imagen 7 Grúa pórtico recrecida (APM Terminals Algeciras)

4.2.2. Transporte a través de la terminal:

Cabezas tractoras con plataformas

Estos equipos son los más utilizados para el transporte horizontal de contenedores por las terminales, debido a que son más rápidos que los equipos de manipulación frontal y las carretillas pórtico. En la imagen 8 podemos ver una cabeza tractora transportando dos contenedores de 20' por la zona de almacenaje. Las plataformas usadas tienen capacidad para un contenedor de 40' o dos de 20'. Como observa, en la siguiente imagen, esta cabeza tractora se desplaza con dos contenedores de 20'.



Imagen 8 Cabeza tractora desplazándose por la zona de almacenaje (APM Terminals Algeciras)

Multitrailer System (MTS)

Se entiende por multitrailer al conjunto de hasta 5 tráileres interconectados entre ellos y tirados por máquinas tractoras. Su mayor ventaja es que se reduce sustancialmente el número de conductores. Un ejemplo de multitrailer es el que se muestra en la imagen 9 donde este transporta cuatro contenedores y está a la espera de ser cargado con un quinto.



Imagen 9 Multitráiler (Terberg Benschop, 2014)

Vehículos auto-guiados

Durante los últimos años, se ha introducido el uso de vehículos auto-guiados en las principales TCP del mundo, empleados para el transporte de contenedores dentro de la terminal. Estos vehículos siguen unos caminos o trayectos ya marcados en el pavimento de la terminal, y son activados con control remoto desde la estación central.

Los hay de dos tipos, los AGVs (Automated Guided Vehicles) y los ALVs (Automated Lift Vehicles). Ambos son vehículos que se mueven de forma autónoma por las terminales para transportar contenedores de un lugar a otro, pero los ALVs, además, son capaces de manipular los contenedores sin ayuda de otro equipo, por lo que se independizan los recorridos de los transportes con los ciclos de carga/descarga de las grúas (decoupling). La imagen 10 muestra unos AGVs dentro de un TCP.



Imagen 10 AGVs (Zyngiridis, 2005)

4.2.3. Almacenamiento y Distribución de Contenedores:

Grúas pórtico de almacenamiento

Este tipo de grúas están presentes tanto en terminales de contenedores de interior y costeras, ya que su función es cargar contenedores de la zona de almacenamiento y depositarlos sobre medios de transporte terrestre y viceversa. Las hay de dos tipos, las que usan neumáticos (“*Rubber Tired Gantry*”- RTG), en la imagen12 se muestra una imagen de una grúa RTG manipulando un contenedor, y las que se mueven por raíles (“*Rail Mounted Gantry*” - RMG, la imagen 11 es la de una grúa RMG moviéndose por raíles para atender a las tareas de carga y descarga procedentes de un tren que ha llegado al puerto.

Esta primera imagen muestra una grúa RMG y la segunda una grúa RTG mientras trabajan en las tareas de carga y descarga en la zona de almacenamiento del puerto:



Imagen 11 Grúa RMG (Konecranes, 2014)



Imagen 12 Grúa RTG durante una operación de carga (Zyngiridis, 2005)

Carretilla pórtico

Este equipo de manipulación es uno de los que más se desplaza por toda la terminal de contenedores. En la literatura se encuentra como “*straddle carriers*”, y su principal función es recoger los contenedores que han colocado en tierra anteriormente otros equipos de mucho mayor tamaño, para transportarlos a otro lugar. La principal ventaja de este tipo de grúa es que no necesita de otros equipos de manipulación para cargar, transportar y descargar un contenedor. Es por ello que se han colocado con la maquinaria de almacenamiento de contenedores.



Imagen 13 Carretilla pórtico (Konecranes, 2014)

Son bastante versátiles y permiten cargar dos contenedores de 20' o uno de 40', trabajar hasta un máximo de 4 contenedores en altura y desplazarse hasta a 30 km/h. En la imagen 13 se muestra una carretilla pórtico. Se puede observar como la carretilla transporta los contenedores en la parte frontal, dónde tiene un elevador para subir y bajar contenedores hasta un máximo de 4 alturas.

Equipos de manipulación frontal

Estos equipos son usados, al igual que las carretillas pórtico, para cargar, transportar y descargar contenedores dentro de la zona de almacenaje. Son menos versátiles que las carretillas pórtico, pero pueden manipular cargas más pesadas. Entre ellos se encuentran la grúa apiladora (Reach Stacker), y el cargador frontal (Front lift Truck), entre otros. A continuación se muestran dos imágenes, imagen 13 y 14, de ambos tipos de grúas mencionados trabajando en las labores de distribución de contenedores.



Imagen 14 Cargador (APM Terminals Algeiras)



Imagen 15 Grúa apiladora (Konecranes, 2014)

4.3. Buques portacontenedores

Una vez explicado los tipos de contenedores y los tipos de maquinaria presentes en la terminal de un puerto de contenedores, el siguiente elemento a describir son los buques portacontenedores. Los buques han sido una pieza clave en la evolución de los puertos, ya que se adaptaron a la aparición del contenedor para aprovechar sus beneficios y completaron así la revolución del transporte marítimo al convertirse en el mejor medio de transporte para este tipo de carga.

En la actualidad, dentro del transporte intermodal, el buque es un eslabón cada vez más importante dentro de los diferentes medios de transporte que intervienen. El uso de contenedores para transportar mercancías agiliza enormemente el cambio de un modo de transporte a otro debido a su alta estandarización, por lo que es propicio para este tipo de sistema de transporte.

4.3.1. Aparición y evolución de los buques portacontenedores

Una vez McLean creó el primer contenedor, este fundó la compañía Sea Land (en la actualidad perteneciente a la empresa Maersk). McLean se asoció con el ingeniero Charles Tushing, que ideó los detalles técnicos para el izado y depósito de los contenedores en los buques. Y como consecuencia rediseñaron los buques para el transporte de contenedores que revolucionarían el modo de transporte de mercancías. Su primer barco, el Ideal X, transportó 58 contenedores en 1956 de New Jersey a Houston en seis días. (A.Oliveira, 2013)

Los primeros buques que transportaron contenedores eran conocidos como *feeder* o barcasas, los cuales tenían una capacidad de 250 TEUs y fueron remplazados por la primera generación de portacontenedores que podían transportar más del triple de contenedores con capacidades alrededor de los 800 TEUs. Desde entonces se ha seguido una tendencia creciente en cuanto al tamaño de los buques con el objetivo de responder a la demanda mundial y hacerlo de la manera más eficiente y con menores costes. En la actualidad, en el sector de las terminales portuarias la mayor novedad es la aparición del primer triple e, el Maersk Mc-Kinney, un buque de 400 metros de eslora, 59 metros de manga y capacidad suficiente para transportar 18000 contenedores. Un breve esquema se muestra en la siguiente figura indicando la evolución de los buques contenedores desde su aparición en 1956 hasta el 2013 con el Triple E. (A.Oliveira, 2013)

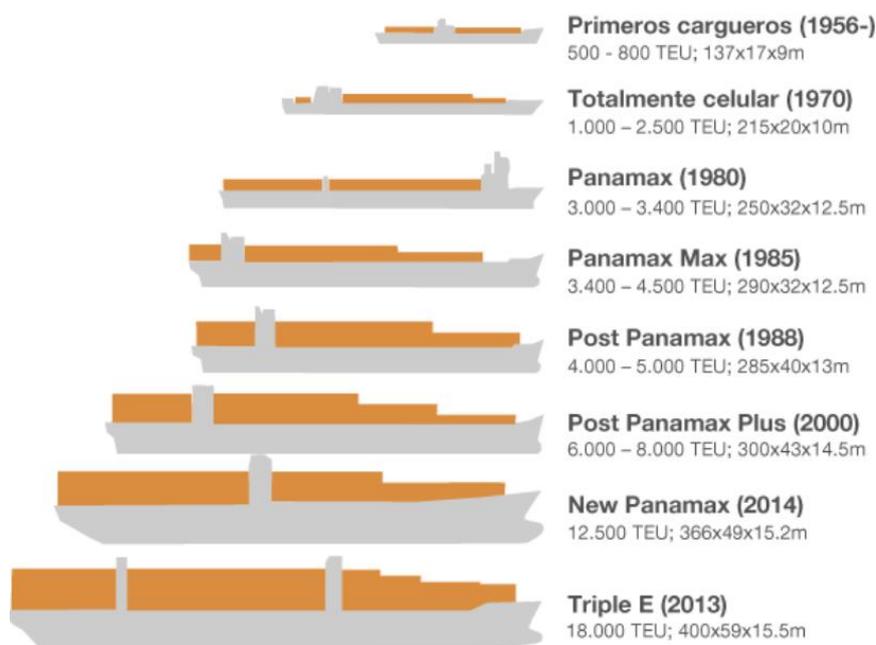


Figura 15 Evolución de los buques portacontenedores (A.Oliveira, 2013)

4.3.2. El futuro de los buques portacontenedores, el Triple E

En una industria tan competitiva, estos inmensos buques darán un nuevo impulso al comercio entre naciones. La naviera Maersk asegura que la gran capacidad de carga de estos buques hace

el transporte de mercancía más eficiente y abarata el costo final de los productos por lo que la conexión entre países cada vez es más fácil y atractiva.

En 2011, la naviera Maersk encargó la construcción de un nuevo buque que recibiría el nombre de TRIPLE-E MAERSK MC-KINNEY MOLLER. Las tres Es que definen este buque vienen de Efficiency, Economy of scale and Environmentally improved (eficiencia energética, economía de escala y mejorado medioambientalmente). Esto se debe a las características del barco que mide 398 metros de largo y es capaz de almacenar una carga de 18000 TEUs. Es por ello, que desde que se empezó a utilizar en el año 2013, se ha convertido en el mayor buque del mundo. (Puerto Bahía de Algeciras, Noviembre, 2013)

Las dimensiones masivas de este tipo de buques permiten un menor consumo por contenedor que cualquier medio de transporte. Esto se consigue viajando a bajas velocidades que reducen el consumo. Además, en términos de eficiencia energética y economías de escala son claves debido al bajo consumo en comparación con la carga transportada. En la imagen 16 se muestra una foto del buque Triple E. Se puede apreciar la gran cantidad de contenedores que puede transportar gracias a sus enormes dimensiones.

Todos estos avances que presenta el Triple E hacen que el coste por contenedor transportado sea menor frente al coste que presenta el transporte con otros buques de menor capacidad, pero por otra parte, por su gran tamaño, tiene una serie de inconvenientes. En la actualidad, pocos puertos tienen capacidad suficiente para acoger la llegada de estos buques, por lo que sus rutas están limitadas a Asia y Europa. (Puerto Bahía de Algeciras, Noviembre, 2013)



Imagen 16 Majestic, el primer triple E (Naviera MAERSK)

Como se ha mencionado anteriormente, además de las ventajas que proporciona su tamaño, Maersk ha incluido una serie de mejoras respecto a otros buques para que el Triple E tenga un papel importante en el transporte marítimo.

- Medioambientalmente mejorado (Environment improved): el Triple-E emite un 20% menos de CO₂ por contenedor a la atmósfera comparado con el Emma Maersk, el mayor portacontenedores del mundo hasta la llegada del Triple-E, y un 50% menos que la media de todos los barcos que cubren la ruta comercial entre Europa y Asia. Esto se consigue viajando a menos velocidad, lo que genera menos contaminación. Un simple esquema del consumo de CO₂ respecto a la velocidad se muestra en la figura 17:

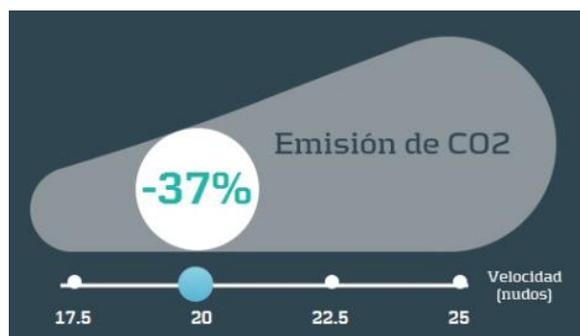


Figura 16 Emisión de CO2 Triple E (A.Oliveira, 2013)

- Eficiencia energética: este buque está equipado con un sistema de recuperación de calor de Siemens que consigue un ahorro del 10% de la potencia generada por los motores principales. Además, al portar hélices de menos palas y de mayor diámetro que las de otros buques de su tipo y hacerlas girar a menos revoluciones hacen que se requiera menos potencia para mover el barco. (Puerto Bahía de Algeciras, Noviembre, 2013)
- Economía de escala: al cargar tantos contenedores, los barcos de la clase Triple-E viajan 184 kilómetros utilizando un solo kWh de energía por tonelada de carga (un avión jumbo viaja un kilómetro con el mismo gasto de energía).

4.4. Concepto de terminal de contenedores portuaria

Una terminal de contenedores es un intercambiador intermodal pasando generalmente la carga desde un transporte marítimo a un transporte terrestre, normalmente camiones o ferrocarril. Para ello, una terminal de contenedores está dotada de una capacidad determinada de almacenamiento en tierra empleada para regular los diferentes ritmos de llegadas de los medios de transportes terrestres y marítimos.

El objetivo crucial de una terminal de contenedores es el proporcionar la organización y los medios necesarios para que el intercambio de contenedores entre los modos de transporte terrestre y marítimo se produzca teniendo siempre presente que se deben realizar con la mayor rapidez, eficiencia y seguridad. Por supuesto, alcanzar la excelencia en estos procesos tiene como consecuencia un mayor respeto al medio ambiente y esencialmente mejorar en aspectos económicos. (Carrasquilla, 2008/2009)

Los buques pasan la mayoría de su vida en puertos, es por ello que reducir el tiempo que este pasa en una terminal de un puerto es clave. Las terminales de contenedores portuarias son un nodo básico en las redes de transporte mundiales, es por ello que todas las operaciones y actividades que se llevan a cabo en ella deben ser optimizadas con el fin de lograr la máxima productividad global en este nodo de la red. Una de las mejores formas de reducir el tiempo de plazo de entrega de un puerto es mejorar la productividad de sus actividades de manipulación de la mercancía. Las operaciones del barco consisten en la descarga del barco durante el cual los contenedores se descargan del barco, y la carga del barco en la que los contenedores se colocan

en el buque. La mayoría del tiempo consumido en el puerto se debe a estas dos operaciones de carga y descarga en un barco.

La gran diferencia entre las terminales de contenedores y el resto de terminales portuarias es que pueden alcanzar un alto grado de sistematización. Esto se debe a los siguientes factores:

- El alto grado de estandarización del elemento transportado, el contenedor.
- La estandarización en la forma de manipulación portuaria.
- El altísimo nivel de intercambios que se efectúan.
- La gran repercusión que representa la tecnología para la rentabilidad de la terminal.

Además, una terminal de contenedores puede ser entendida como un sistema integrado por varios subsistemas bien diferenciados entre sí, con conexión física y de información con las redes de transporte terrestres y marítimas. Los subsistemas en cuestión son los siguientes:

4.4.1. Subsistema de carga-descarga de contenedores

El subsistema de carga-descarga se encarga de resolver la interfaz marítima en el que los contenedores salen y entran del puerto.

La figura 18 muestra un esquema simplificado del procedimiento de carga y descarga en un puerto. En ella se puede observar como el buque es atendido por una grúa pórtico que carga y descarga contenedores. Esos contenedores son trasladados por parte del camión, a través de la terminal y hasta la zona de almacenamiento. En la zona de almacenamiento, se encuentran las grúas RTG que se encarga de colocar los contenedores que llegan al puerto y de entregar aquellos que deben salir de él.

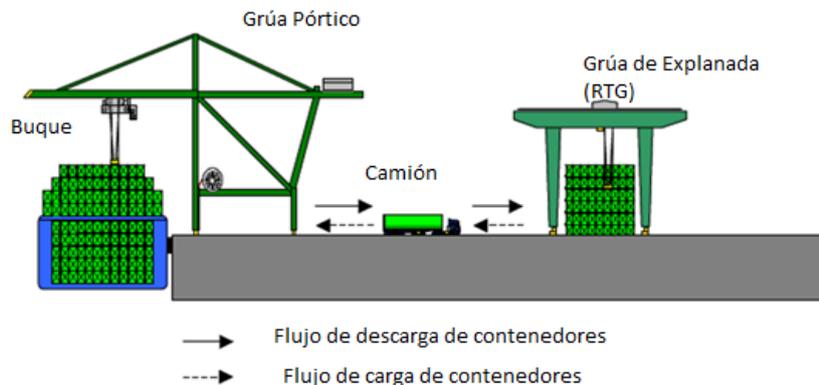


Figura 17 Esquema del proceso de carga y descarga de contenedores entre un buque y la explanada

Este subsistema se caracteriza por el predominio del buque y las consecuencias que ello conlleva:

- La presencia del buque en este subsistema conlleva a la existencia de agentes especializados para tratar con el buque que llega al puerto. Algunos de estos agentes son los armadores, navieros y consignatarios. Esta exigencia de agentes suele ser muy superior a las de las propias terminales

- Por otro lado, existen los problemas relacionados al creciente aumento de las dimensiones de los grandes buques portacontenedores. Este aumento de tamaño lleva consigo problemas como la necesidad de plantear canales de navegación y muelles cada vez mayores y con una holgura de acuerdo a las exigencias de seguridad. Estos factores tienen como resultado el aumento de las inversiones portuarias provocando un sobrecoste. Estas inversiones suelen requerir instalaciones más grandes y eficientes. Más detalladamente, consisten en:
 - Necesidad de adquirir equipos de carga y descarga cada vez mayores y con mayor rapidez de operación.
 - Necesidades de infraestructura elevadas.
 - Requerimientos de rendimiento muy altos en las operaciones de carga y descarga; y exigencia de las navieras de la reducción del tiempo de estancia del buque en el puerto, lo que obliga a las terminales a aumentar constantemente su productividad.

Por todo ello se puede concluir que el objetivo principal del subsistema de la carga-descarga de buques es atender la demanda de carga y descarga de contenedores del buque con la mayor rapidez y seguridad posibles, tanto en la atención directa al barco como en lo que respecta a la relación con el medio de transporte usado para mover las cargas dentro de la terminal. (Costa, 2006)

En la imagen 17 se muestra la operación de descarga de un buque, llevada a cabo por varias grúas pórtico de muelle distribuidas a lo largo del mismo.



Imagen 17 Grúas pórtico de muelle durante una operación de descarga de un buque (APM Terminals Algeciras)

La eficiencia con que se lleve a cabo la operación de carga-descarga dependerá de factores como:

- El tamaño, la velocidad, y el número de grúas de que se disponga.
- El grado de automatización de las grúas, así como el tipo de vehículo utilizado para el transporte y el número de operarios necesarios ello.
- Los sistemas de comunicación desarrollados con el resto de la terminal
- El nivel de capacitación de los recursos humanos implicados en la operación.

- La exactitud de la información suministrada por el consignatario, en lo que a la llegada y demás datos del buque se refiere.
- La anchura y longitud del muelle.
- El tipo de tráfico que acoja la terminal. Puede ser una terminal pública con muchos clientes o una terminal privada con uno o pocos clientes.
- El grado de estandarización de la mercancía manipulada.

4.4.2. Subsistema de conexión interna

El subsistema de conexión interna es el encargado de asegurar el transporte horizontal de contenedores entre los diversos subsistemas con la mayor rapidez, seguridad y eficacia posibles. Comprende tanto el movimiento físico como el de información que se genera durante las diversas operaciones.

A continuación, se muestran, en la figura 19, los subsistemas integrados en la terminal y la disposición típica que se suele hacer en ésta. Se puede observar como la zona de almacenaje se encuentra junto al muelle y distribuida en bloques de contenedores apilados. Los bloques están atendidos por grúas RTG que se encargan de las labores de distribución y colocación de contenedores. Por otro lado, los barcos situados en el muelle están atendidos por grúas pórtico que se encargan de cargar y descarga el buque.

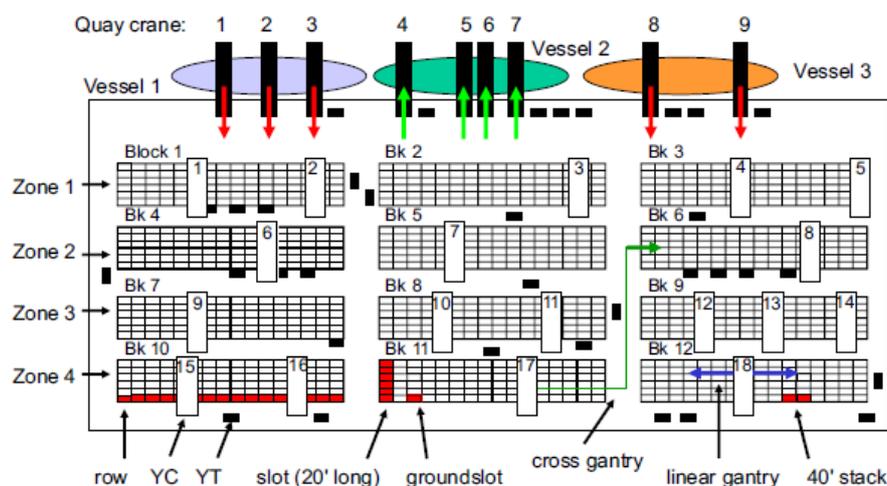


Figura 18 Layout de una terminal marítima de contenedores portuaria (Matthew E.H. Peteringa, 2008)

En la imagen 18 se muestran dos cabezas tractoras que se desplazan por la terminal. Como se puede observar, dentro de una terminal, están perfectamente delimitadas todas las zonas de tránsito y almacenaje para facilitar los procesos que se llevan a cabo y reducir accidentes.



Imagen 18 Cabezas tractoras con plataformas desplazándose dentro de la terminal (APM Terminals Algeciras)

4.4.3. Subsistema de recepción y entrega terrestre

El subsistema de recepción y entrega terrestre está formado por las entradas, instalaciones y equipos necesarios para controlar y manipular las cargas que entran y salen de la terminal por vía terrestre. Este subsistema se encarga de la interfaz terrestre, donde se tiene que atender a dos modos de transporte bien definidos: el del transporte por carretera y el del ferrocarril.

El principal objetivo de este subsistema es facilitar la recepción o entrega de mercancías de una manera rápida. Este subsistema siempre debe asegurar que se cumplen las condiciones de seguridad y se facilita la obtención de la información. (Costa, 2006)

Los elementos que más afectan a este subsistema son el número de puertas que existen para atender a los vehículos que acceden o salen de la terminal, el medio de obtención y comunicación de la información establecido en el control central de la terminal, el control del contenedor y su inspección física, y el tipo de tráfico de la terminal ya sea de transbordo de contenedores o más centrado en el comercio exterior.

El transporte por carretera presenta un grado de automatización enorme y presenta complejos condicionantes a la terminal debido a que este tiene horas punta características a lo largo del día, y con requerimientos muy variables. Esta variabilidad obliga a la terminal a adaptarse a los ritmos de transporte terrestre.

Por otro lado, el transporte por ferrocarril suele suponer únicamente un pequeño porcentaje del tráfico terrestre que accede a la terminal. Además se diferencia del transporte por carretera en que el ferrocarril permite concentrar la actividad en los momentos que mejor convengan a la terminal, a lo que hay que sumarle, permite obtener niveles de rendimiento elevados, ofreciendo también una mejor eficacia en el intercambio de documentos. (Carrasquilla, 2008/2009)

En la imagen 18, se muestra la entrada y salida de camiones por las puertas que componen la entrada por carretera de una TCP. En esta entrada se puede apreciar cómo se forma colas al tener que esperar a los controles necesarios y a que sean atendidos adecuadamente.



Imagen 19 Entrada por carretera de una TCP (Cadena de suministro, 2010)

4.4.4. Subsistema de almacenamiento de contenedores

El subsistema de almacenamiento de contenedores ocupa la mayor parte de la superficie de la terminal. Este subsistema se intercala entre el subsistema de la carga-descarga de buques y el de recepción y entrega terrestres. Las dimensiones de la zona de almacenamiento y su distribución dependen del volumen de tráfico de contenedores que soportará la terminal y de los equipos de manipulación escogidos.

El principal objetivo del subsistema de almacenamiento de contenedores es proporcionar una forma eficaz de atender los diferentes ritmos que existen entre la carga y descarga de buques, y la recepción y entrega de las mercancías a los modos de transporte terrestre. (Chujian Zhang, 2001)

La gestión de esta zona de ha convertido en esencial para el buen funcionamiento de las terminales y ha exigido la utilización de grandes superficies de almacenamiento de contenedores. Algunas de las razones de esta importancia de la zona de almacenamiento son las siguientes:

- El aumento del tráfico marítimo
- El aumento de la tasa de contenerización
- El porte de las embarcaciones
- La concentración progresiva en pocos puertos.

El diseño del subsistema de almacenamiento viene determinado, en gran medida, por el tipo de medios de manipulación que se van a utilizar. Como se explicó anteriormente en los diferentes tipos de maquinaria utilizada, estos medios permiten grados de apilamiento y posibilidades de automatización muy diversas ya que su elección condiciona a la propia terminal.

De los sistemas de manipulación mencionados anteriormente, en el almacenamiento de contenedores destacan las siguientes máquinas:

- Grúas pórtico de muelle
- Grúas polivalentes
- Grúas pórtico de almacenamiento (RTG y RMG)
- Carretillas pórtico
- Equipos de manipulación frontal (grúas apiladoras, apilador frontal...)
- Cabezas tractoras con plataformas (de una a 5 plataformas)
- Vehículos auto-guiados (AVG y ALV)

Además de todo lo expuesto anteriormente, también hay que tener en cuenta zonas adicionales debido a factores como:

- La existencia de contenedores refrigerados requiere de la disposición de unas zonas de almacenamiento que cuenten con las conexiones eléctricas necesarias para que estos contenedores puedan mantener la cadena de frío.
- Los contenedores que transportan mercancías peligrosas deben de ser situados en algunos casos en lugares separados del tráfico ordinario, de manera que se cumplan las exigencias de seguridad. En otros casos es suficiente con que se segreguen unos de otros, respetando unas distancias mínimas.
- Inspecciones de contenedores requeridas por organismos públicos (aduana, inspección fitosanitaria, etc.). Para ello, se dispondrá de un lugar habilitado.

Además, en el subsistema de almacenamiento se sitúan distintas edificaciones complementarias a la zona de almacenamiento. Primero están las oficinas de la terminal donde se llevan a cabo las actividades administrativas y la relación con los clientes. Dentro de estas oficinas, está la sala de control donde se deciden, controlan y registran las operaciones de la terminal. Segundo, los talleres dónde se realizan las reparaciones y operaciones de mantenimiento. Tercero, el almacén de consolidación, que se utiliza como conexión con el interfaz terrestre recibiendo o entregando mercancía y realizando la ruptura o grupaje de carga. Esta actividad logística supone un valor añadido para las mercancías.

En la imagen 19, se muestra la zona de almacenaje de la Terminal de APM en Algeciras y las grúas RTGs de que disponen para cargar y descargar los contenedores. Se puede apreciar como

Modelo de simulación para el análisis de grúas de explanada en una Terminal de Contenedores Portuaria

la zona de almacenaje está ordenada por hileras de contenedores, separadas por calles por donde circulan las cabezas tractoras que transportan los contenedores dentro de la terminal.



Imagen 20 Zona de almacenaje (APM Terminals Algeciras)

5. Planificación de TCPs

Los buques pasan la mayoría de su vida en puertos, es por ello que reducir el tiempo que este pasa en una terminal de un puerto es clave. Las terminales de contenedores portuarias son un nodo básico en las redes de transporte mundiales, es por ello que todas las operaciones y actividades que se llevan a cabo en ella deben ser optimizadas con el fin de lograr la máxima productividad global en este nodo de la red. Una de las mejores formas de reducir el tiempo de plazo de entrega de un puerto es mejorar la productividad de sus actividades de manipulación de la mercancía. Las operaciones del barco consisten en la descarga del barco durante el cual los contenedores se descargan del barco, y la carga del barco en la que los contenedores se colocan en el buque. La mayoría del tiempo consumido en el puerto se debe a estas dos operaciones de carga y descarga en un barco.

En general, el proceso de planificación de las operaciones de un barco consiste en una planificación de muelles, planificación de grúas de los muelles, y la secuencia de carga y descarga. Durante este proceso, el tiempo de atraque y la posición de un contenedor se determinan. A través de proceso de programación de grúas de muelle, se determina la sección del barco de la que se encarga la grúa y el tiempo de servicio de cada una de ellas. Para ello, es necesario que los trabajadores de la terminal tengan información acerca del plan de la bodega del barco y el intervalo de tiempo que cada grúa de muelle está disponible. (Ng W. , 2003) Una vez se ha construido la planificación de las grúas de muelle, la secuencia de contenedores para las operaciones de descarga y carga se determina. La figura 20 muestra un esquema simplificado de las operaciones que se llevan a cabo en un puerto, desde la descarga del buque hasta la colocación en la zona de almacenamiento. En esta figura se observa como el buque que llega al puerto es atendido por una grúa pórtico para cargar y descargar los contenedores que son transportados por camiones dentro de la terminal y hasta la zona de almacenamiento. En la zona de almacenamiento, se encuentran grúas RTG que se encargan de las tareas de distribución y colocación de contenedores.

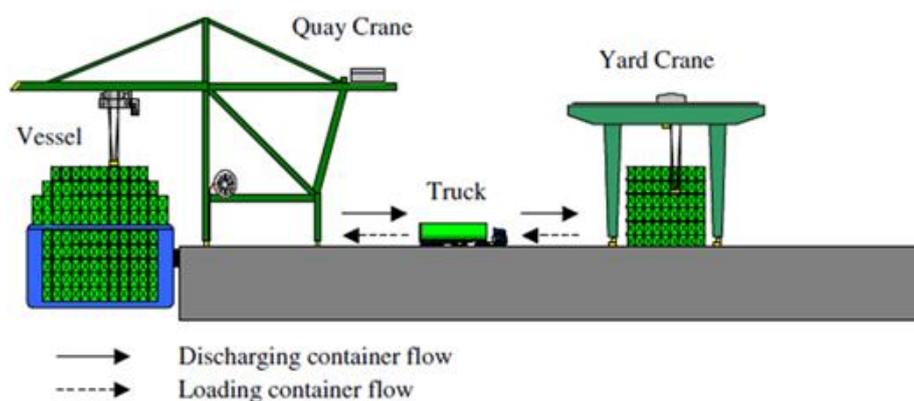


Figura 19 Flujo de contenedores en las operaciones de las terminales (Ng W. , 2003)

Durante el procedimiento de descarga, los contenedores de llegada se colocan uno a uno en un patio en el orden que se van descargando del buque sin considerar los atributos de cada contenedor. De esta manera, el trabajo realizado por ambas grúas, las de muelle y las de patio, se pueden realizar lo más rápido y de la manera más sencilla posible. Sin embargo, a la hora de

realizar las operaciones de carga, se deben satisfacer una serie de restricciones como peso, destino y tamaño de cada contenedor. También se debe tener en cuenta posibles interferencias entre grúas, tanto las de muelle como las de patio. Es por ello, que se deben generar planes de planificación para las operaciones de ambos tipos de grúas para que las operaciones del puerto funcionen de la manera más eficiente posible.

5.1. Análisis de los subsistemas de un puerto

Una vez la planificación se ha realizado, se deben llevar los contenedores a la grúa de muelle. Los contenedores deben llegar de la manera indicada por la planificación independientemente de dónde se encuentren situadas en el patio del puerto. Es por ello, que surgen los problemas de recogida de contenedores ya que es aquí donde la eficiencia del proceso de carga depende realmente.

La operativa de la terminal de contenedores marítima (TCM) ha sido dividida en sub-sistemas por diferentes autores para aprovechar mejor los recursos ya que existe una gran variedad de maquinaria asociada a las operaciones que se realizan en una terminal. La clasificación de las principales operaciones de una TCM se muestran en la figura 21. Como se puede observar, estas se clasifican en operativa de buque, operativa de almacenaje y apilado y operativa de transferencia. En la operativa de buque se encuentra la asignación de muelle, la planificación de estiba y programación de las grúas pórtico. Para almacenaje y apilado se deben planificar la localización y relocalización de contenedores en la explanada. Por último la operativa de transferencia consiste en la optimización de transporte de muelles, programación de grúas y transporte terrestre.

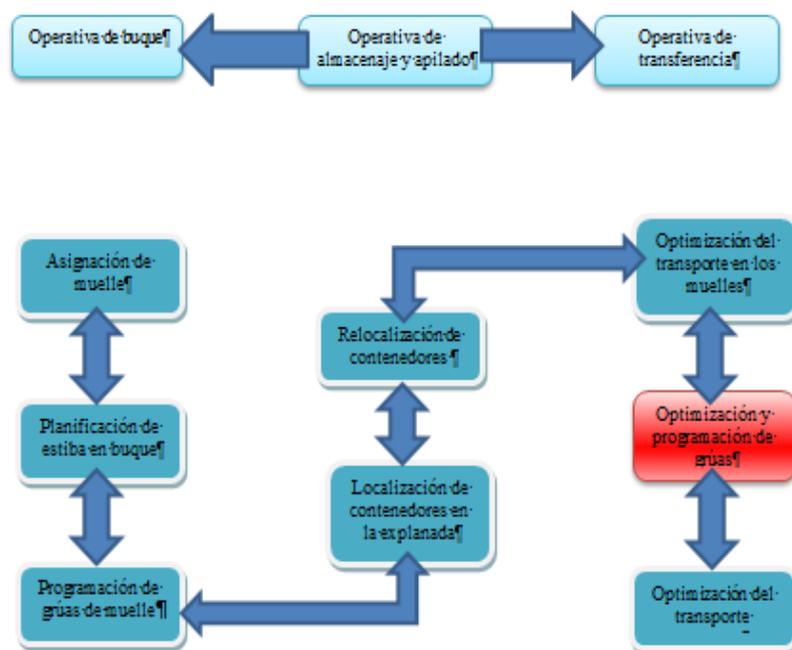


Figura 20 Clasificación de las principales operaciones de una TCM (Arango, 2014)

Las operaciones principales que se estudian para optimizar mejor sus funciones teniendo en cuenta la operativa a trabajar y los objetivos a conseguir son los siguientes:

- Planificación de estiba en buque
- Relocalización de contenedores
- Optimización y programación de grúas
- Optimización del transporte terrestre

5.1.1. Planificación de estiba en buque o Plan maestro de muelle

Con el objetivo de realizar la operación de carga en el menor tiempo posible y maximizar la capacidad su capacidad de carga y cumplir los protocolos de seguridad, cada una de las navieras realiza un plan de estiba para cada TCM. Una vez realizado, este plan se entrega a los operadores de la terminal. Sin embargo, a menudo suelen surgir problemas ya que las TCM también realizan su propio plan de estiba diferente al de la naviera. Esto provoca que se deban recolocar los contenedores en la zona de almacenaje.

Para solucionar este problema, se han creado en los últimos años modelos de optimización que tratan de minimizar el tiempo que el buque permanece atracado en la terminal, maximizar la utilización del buque y tienen en cuenta la estabilidad de cada bloque de contenedores, además de su peso y tamaño. Sin olvidar que también deben incluir el puerto de destino.

Estos modelos de optimización usan como restricciones aspectos estructurales y operacionales relacionados tanto con los buques como con los contenedores. Su objetivo se centra en minimizar el tiempo total de apilado, el cual está estrechamente ligado con el tiempo que se necesita para cargar todos los contenedores en el buque, y en minimizar el coste de relocalización de contenedores. (Kim, 2006)

5.1.2. Relocalización de contenedores

Uno de los principales objetivos en una terminal, es conseguir un óptimo apilamiento de los contenedores en la zona de almacenaje. Para ello se realiza una constante recolocación de los contenedores en lo que se conoce como Container Pre-Marshalling Problem. Esta optimización es clave para facilitar el desarrollo de otros procesos como la carga de contenedores a los diferentes modos de transporte. (Ng W. C., 2005)

Para la relocalización de contenedores en la zona de almacenaje se tienen en cuenta aspectos como buque a cargar, fecha de salida, peso de contenedores, tamaño y puerto de destino.

Se pueden encontrar diferentes trabajos que utilizan diferentes métodos para optimizar esta operación. Unos autores trabajan con las fechas de salida de cada contenedor colocando los que tienen fecha de salida más cercana arriba. En otro caso, se trata de minimizar la relocalización de contenedores. Se trata de definir SDU (unidades de demanda almacenada) a aquellos contenedores que ya no tienen por qué ser recolocados y se define SSU una cantidad mínima de espacios que se debe proporcionar la cantidad de espacios que deben proporcionar a un SDU.

También se han propuesto redes de programación entera que tiene como objetivo minimizar el número de contenedores en el proceso de pre-agrupación para preparar los contenedores para la operación de carga en el buque.

5.1.3. Optimización/ programación de las grúas

Una vez que los contenedores han sido descargados del buque o en el momento de cargarlos, comienza la interacción con la zona de almacenamiento. Es por ello, que es de gran importancia aplicar métodos de optimización para planificar el trabajo de grúas en la explanada. Las grúas de explanada como son las RTG (Rubber Tyred Gantry crane) y las RMG (Rail Mounted Gantry crane) se encargan de la relocalización de contenedores, de la recepción de contenedores que entran a la terminal para ser exportados y de la recepción y entrega de contenedores a maquinaria de manipulación terrestre. (Ng W. C., 2005)

Este tipo de problema tiene como principal objetivo minimizar los tiempos de espera del resto de maquinaria que se puede ver afectada por las operaciones de las grúas de explanada, como es el caso de los camiones que mueven los contenedores a través de la terminal desde la zona de muelles hasta la explanada.

A la hora de crear modelos de optimización, aparte de tener en cuenta los tiempos de espera, también se debe pensar en minimizar el tiempo de operaciones de buque para que pueda abandonar la terminal cuantos antes y en tratar de incrementar el número de contenedores tratados en la terminal.

Los autores que han realizado modelos de optimización para optimizar las operaciones de grúas de explanada (Yard Scheduling Problem) han tenido que pensar en los problemas que surgen en la realidad. Uno de ellos es la interferencia que puede ocasionarse entre las grúas que trabajan en los bloques de contenedores de la explanada. (Chuqian Zhang, 2001) Otro problema ocasional es el inconveniente que puede surgir cuando se desplaza una grúa entre módulos. Estas hacen unos giros complicados y lentos que pueden dificultar el resto de tareas tanto de las otras grúas como de camiones. Sumado a estos problemas, está el hecho que más de una grúa puede trabajar en un mismo bloque de contenedores. En la figura 22 se muestra los distintos bloques en la zona de almacenamiento de un puerto con las grúas RTG de carga y descarga. En esta figura se puede observar como los bloques están organizados en zonas o módulos para realizar el estudio del movimiento de grúas RTG entre ellos.

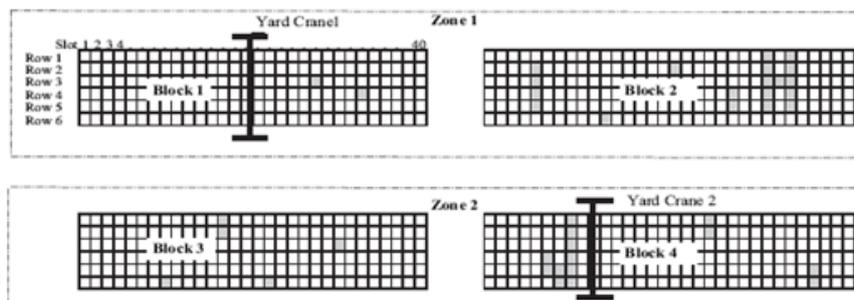


Figura 21 Yard crane scheduling (Ng W. C., 2005) Ng (2005) An effective heuristic for scheduling a yard crane to handle jobs with different ready times.

Distintos objetivos se han tratado de alcanzar en los distintos modelos como es el de minimizar el tiempo de operación de las grúas o minimizar los tiempos de espera de los vehículos de transferencia de contenedores entre el muelle y la explanada. Todo ello debe tener en cuenta el número de grúas RTG disponibles, el flujo de contenedores, los tipos de vehículos terrestres y la distribución de los contenedores en la zona de almacenamiento. La figura 23 muestra un tipo de distribución de contenedores en la zona de explanada y las diferentes distribuciones de RTG para la carga y descarga de contenedores.

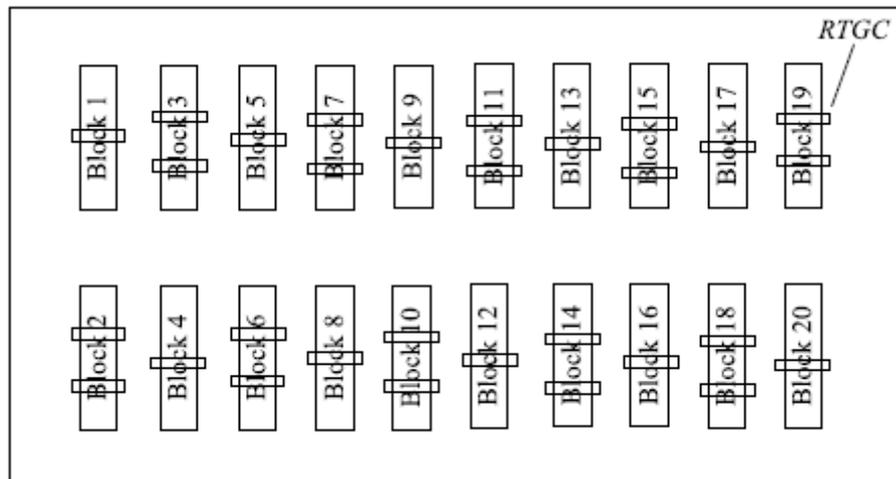


Figura 22 Distribución RTGs en la ZA (Chuqian Zhang, 2001) Zhang 2001 Dynamic crane deployment in container storage yards

5.1.4 Optimización del transporte terrestre

En esta operativa se planifican todos los movimientos de contenedores que se realizan en una terminal. Los contenedores se deben mover para no estorbar el resto de actividades que se realizan en la terminal como son las inspecciones de aduanas, la reubicación de contenedores vacíos, el transporte de los contenedores desde la zona de descarga hasta la zona de almacenaje o el desembalaje de la carga.

Además dependiendo del tipo de terminal, el flujo de cada modo de transporte puede ser distinto ya que algunos pueden tener acceso sólo de camiones mientras que otros incluyen la llegada de trenes. Esto es importante ya que la carga y descarga en las zonas de llegada terrestres generan gran cantidad de movimientos de contenedores en la terminal.

Para gestionar este transporte dentro de la terminal uno de los objetivos principales es minimizar las distancias dentro de la terminal y minimizar costes. Para ello se tratará de cambiar las rutas que siguen los camiones a la hora de realizar sus trabajos. Otro posible enfoque, es el de centrarse en la gestión de sólo ciertas máquinas como el transporte de camiones.

6. Método de Simulación

Para lograr la implementación de sistemas automatizados flexibles, complejos y altamente precisos, se utiliza la herramienta de simulación en una gran variedad de casos. Esta gran utilización se debe a que la experimentación sea casi imposible en muchos casos debido a la extrema complejidad que existe a la hora de construir sistemas de test y al alto coste que esto supone.

Para entender mejor la importancia de la simulación, se deben explicar los conceptos de sistema y modelo.

Para comenzar, un sistema es una entidad real o ficticia restringida por un entorno. Dentro de los sistemas encontramos los sistemas reales y los dinámicos. Siendo los primeros, la combinación de elementos que se relacionan estructuralmente e interactúan entre sí. En el otro caso, los sistemas dinámicos son construcciones formales que aportan conceptos generales de modelización. (Arango, 2014)

El segundo concepto a tener en cuenta es el concepto de modelo. Un modelo es una representación inteligible de un sistema. En el caso de que un sistema sea muy complejo y que no se pueda resolver el problema directamente sobre el sistema real, se suelen utilizar modelos de dichos sistemas para resolver el problema. Por lo tanto, el motivo de crear y utilizar modelos se debe a que no se puede experimentar directamente sobre el sistema que se quiere estudiar debido a su alto coste o incluso porque el sistema ni siquiera existe.

Una vez explicado lo que es un modelo, se llama modelado de sistemas al proceso de pensar y razonar acerca de un sistema obteniendo un modelo. A la hora de modelar, se distinguen dos grupos de métodos que se utilizan para modelar sistemas complejos. Por un lado, los métodos analíticos son simbólicos y se utilizan para obtener soluciones generales al problema. El problema que surge con este método es que los sistemas son demasiado complejos y por lo tanto, analíticamente prohibitivos de evaluar. La única solución para resolver un problema analítico demasiado complejo sería simplificando el modelo. Sin embargo, esta simplificación podría alejarse demasiado de la realidad. El siguiente grupo de métodos de modelado son los basados en simulación. Al contrario de los métodos analíticos, los métodos de simulación no obtienen soluciones generales sino soluciones particulares para el problema. Este método es muy útil para problemas complejos ya que con la simulación se pueden probar distintas condiciones de entrada para obtener distintos resultados de salida significativos.

En resumen, la simulación presenta muchas ventajas como las listadas a continuación que la convierten en una herramienta efectiva de entrenamiento:

- La reducción del tiempo de desarrollo del sistema.
- Permite que se pueda experimentar de manera artificial con el sistema.
- No es costoso.
- Se puede usar el mismo modelo muchas veces.
- Su empleo es más sencillo que ciertas técnicas analíticas y precisa menos simplificaciones.
- Permite una simulación controlada.
- No afecta al sistema real.

En oposición a estas ventajas, la simulación tiene los siguientes inconvenientes:

- El tiempo de desarrollo del modelo de simulación es elevado.
- Los resultados pueden divergir de la realidad. Se deben validar.
- Requieren una gran cantidad de datos para reproducirlo.

Una vez explicadas las razones de la importancia de la simulación y sus distintas ventajas e inconvenientes, se va a explicar brevemente los pasos requeridos para crear un simulador. Se pueden distinguir siete pasos o fases con los cuales se obtendrá el modelo de simulación para el problema en cuestión. Estos se listan a continuación:

1. Planteamiento del problema.
2. Recolección de análisis de datos de entrada.
3. Modelización.
4. Implementación.
5. Verificación y validación del modelo.
6. Experimento de simulación y optimización.
7. Análisis de datos de salida.

1. Planteamiento del problema: En esta primera fase se toma un sistema real y se trata de entenderlo. Para conseguir entenderlo, se identifica el problema a resolver y se trata de describir en términos de objetos y procesos de un marco físico. A continuación, se identifican las variables de entrada y salida del sistema, y se trata de definir una función objetivo. Una vez identificados estas partes del sistema, se construye una estructura preliminar de un modelo simplificado del que obtendremos al final. Cuando la estructura preliminar se termina, se construye un modelo más detallado identificando todos los objetivos.

2. Recolección de análisis de datos de entrada: La segunda fase de la construcción del modelo de simulación consiste en estudiar el sistema real para obtener los datos de entrada mediante observación. En esta fase también se eligen que datos serán tratados como aleatorios y cuáles como determinísticos.

3. Modelización: Esta tercera fase es el paso en el que se construye un modelo del sistema con los aspectos que se quieren simular. Esta fase consta de dos partes. En la primera parte se trata de comprender el sistema basándose en la definición de variables de estado internas, y se realiza una descripción de la operación del sistema cuando ocurre un evento. En la segunda parte, se construye el modelo definiendo objetos, atributos, métodos etc. Además, en este paso se elige el lenguaje de implementación. Más adelante, se elegirá los métodos más utilizados para la modelización como son los grafos de eventos y los diagramas de ciclo de actividades.

4. Implementación: Con el lenguaje elegido previamente, se construye una simulación del modelo para que sea ejecutado en una computadora.

5. Verificación y validación del modelo: Por un lado la verificación es un asunto de consistencia interna entre el modelo lógico y el de la computadora mientras que la

validación trata de enfocar la correspondencia entre el modelo y al realidad. El modelo y su implementación deben refinarse en base a la validación.

6. **Experimento de simulación y optimización:** Se realiza la simulación repetidamente con variables de decisión en varios niveles para crear un diseño de experimentos.
7. **Análisis de los datos de salida:** En esta última fase se analizan las salidas de simulación para comprender el comportamiento del sistema. Estas salidas se utilizan para obtener respuestas del comportamiento del sistema original.

Una vez explicados los siete pasos a seguir para crear un modelo de simulación, a continuación, debido a la importancia de la modelización, se explica brevemente los métodos para la modelización.

6.1. Grafo de Eventos

Primero, está el grafo de eventos. Esta herramienta se basa en la interacción entre los sucesos discretos que ocurren en el sistema y las variables de estado de dicho sistema. Por un lado, las variables de estado definen el estado del sistema y a partir del valor de estas junto a la estructura del modelo, se puede conocer el estado del sistema. (Arango, 2014)

El sistema se representa mediante un grafo $G(N, A)$ dónde los nodos representan los sucesos que ocurren en el sistema mientras que los arcos representan las transiciones de un suceso a otro. Además, los arcos se pueden dividir en dos tipos. Los arcos condicionales que se caracterizan porque permiten el paso de un suceso a otro si se cumple una cierta restricción. El otro tipo de arco son los incondicionales, estos no dependen de ninguna restricción. La figura 24 muestra un esquema de un grafo de eventos. Se muestra como entre el suceso i y j existe un arco que puede ser condicional o incondicional. En el caso de ser condicional, este arco llevará asociado una condición que se debe cumplir para que se pase del suceso i al suceso j . Por otro lado, si es de tipo incondicional, sólo lleva un tiempo asociado que debe transcurrir para que pase de un suceso a otro.

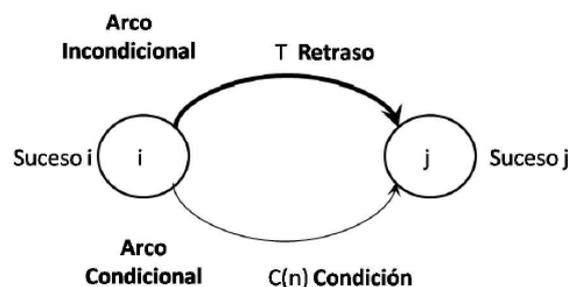


Figura 23 Esquema de un grafo de eventos (Arango, 2014)

6.2. Diagrama de Ciclo de Actividades

Segundo, el diagrama de ciclo de actividades es una herramienta para la representación de modelos de simulación discretos. Cada entidad del sistema tiene un ciclo de actividades en su vida dentro del sistema, y entre una actividad y otra, pasa por una cola, alternándose actividades y colas en un ciclo, siendo cada ciclo cerrado. Las entidades pueden ser permanentes o temporales.

Además se pueden distinguir dos formas de ciclo de actividades en función del comportamiento de las entidades. Las que siguen una secuencia definida de actividades y las que siguen varias secuencias condicionadas. La figura 25 muestra un ejemplo de un diagrama de ciclo de actividades. Las colas se representan por círculos y las actividades por rectángulos. Se puede apreciar como colas y actividades se intercalan como se acaba de explicar.

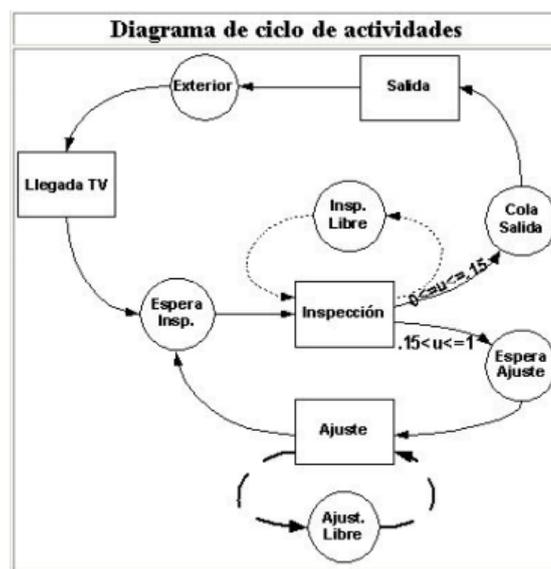


Figura 24 Ejemplo de un diagrama de ciclo de actividades (Eguía Salinas & Racero Moreno, 2013)

6.3. Simulador Arena

Para realizar la simulación del puerto de contenedores, se ha utilizado el simulador Arena Rockwell Automation. El simulador Arena se encarga de la codificación del grafo de eventos o el diagrama de ciclo de actividades. (Arango, 2014)

En este simulador, la simulación está orientada al proceso, este hecho permite que se pueda obtener una descripción completa del proceso que sigue una entidad dentro de la simulación.

Las principales ventajas del simulador Arena son las siguientes:

- La ejecución del modelo de simulación construido mediante la orientación al proceso se realiza siguiendo la orientación a eventos.

- Arena permite acceder al código en el que el modelo de simulación está construido, permite descender hasta la lógica de los eventos.
- Se utiliza una base gráfica asociada a la construcción de diagramas de flujo que muestra los pasos que debe seguir una entidad para el desarrollo de los modelos de Arena.
- Arena no requiere la codificación de los programas para la construcción de los modelos.
- Dispone de módulos gráficos para facilitar la descripción de los procesos asociados a los sistemas que se están modelando
- Arena tiene una estructura jerárquica, y aunque se presenta como una herramienta de modelación de alto nivel (asistida gráficamente), tiene la capacidad de alcanzar un alto grado de flexibilidad al permitir modificar directamente el código computacional.

Antes de entrar en detalle en la explicación de la simulación del puerto realizada en Arena, se realizará un breve resumen sobre los elementos básicos en los que se basa el lenguaje Arena.

Los elementos básicos que componen el lenguaje del simulador ARENA son los listados a continuación:

- Módulos: son los nodos de la red donde circulan las entidades. Son los elementos básicos con los que se construye el modelo y con ellos se describe la dinámica asociada a los procesos del sistema. (Arango, 2014)
- Entidades: se utilizan para representar todo tipo de cosas, ya sean objetos, reales o imaginarios, o incluso personas. Representan lo que está siendo atendido o producido en el proceso. Los movimientos de las entidades causan cambios en el estado del sistema. (Arango, 2014)
- Atributos: son las características de las entidades. Sirven para diferenciar unas entidades de otras. (Arango, 2014)
- Sucesos: hechos que ocurren en un instante de tiempo y origina cambios en las entidades. Durante una actividad no hay sucesos. (Arango, 2014)
- Recurso: son cosas como personal, equipo o espacio. Las entidades suelen competir entre ellas para obtener los servicios de los recursos. Mientras que un recurso este siendo utilizado, las demás entidades que requieran el servicio de este, deberán esperar en cola a que termine. (Arango, 2014)
- Actividades: son las funciones que realizan los recursos sobre las entidades. Todas las actividades tienen una duración aunque sea de valor nulo. (Arango, 2014)
- Cola: son las filas donde las entidades esperan mientras librea el recurso que necesitan. Las colas pueden tener capacidades. (Arango, 2014)
- Variable: son valores globales que pueden sufrir cambios en cualquier lugar dentro del modelo. Las variables definidas por el usuario se pueden cambiar durante el tiempo de simulación, como son el inventario, la tasa de llegada, etc. (Arango, 2014)
- Dato: son módulos que sirven para definir las características de varios procesos y elementos del modelo. No tienen representación en el diagrama de flujo del modelo pero aparecen en la hoja de cálculo para definir las características de procesos y elementos del modelo. (Arango, 2014)

6.4. Descripción Arena

Este documento trata de la simulación realizada con el programa Arena 14 de un puerto de contenedores de carga y descarga. Esta simulación refleja las operaciones que tienen lugar en el puerto, además de simular la lógica de selección de RTGs para realizar las operaciones de exportación e importación. Para reflejarlo de la manera más realista posible, la simulación muestra desde que el barco, tren y camión llegan al puerto, hasta que estos se van una vez se haya realizado las tareas de carga y/o descarga dentro del puerto, pasando por el transporte, selección y colocación de contenedores dentro del puerto utilizando grúas RTG.

Dentro de la simulación, se han utilizado una serie de variables y gráficos que se han utilizado como controladores del proceso que tiene lugar dentro del puerto.

Las partes más destacables del modelo Arena son las siguientes:

- El modelo de simulación está dividido en las siguientes partes:
- Llegada de Buques
- Solicitud de RTGs para los buques
- Llegada de Trenes
- Solicitud de RTGs para los trenes
- Llegada de Camiones
- Bloques de almacenamiento numerados del 1 al 12 en hileras del 1 al 3.

Para comenzar, se debe explicar una serie de características tanto del puerto como de las tareas para llegar a entender la lógica en la que se ha basado esta simulación del puerto. El puerto simulado, cuenta con tres hileras de cuatro bloques cada una. Cada uno de estos bloques contiene un número de posiciones dónde se podrán cargar y descargar los contenedores. Entre cada bloque existe un espacio del tamaño de dos posiciones, permitiendo simular de manera más realista el desplazamiento de RTGs en la zona de almacenamiento. La figura 26 muestra la distribución de los bloques de contenedores numerados del 1 al 12 y ordenados por hileras. Además esta figura muestra las posiciones de los muelles, de la estación de trenes y la zona de llegada de camiones.

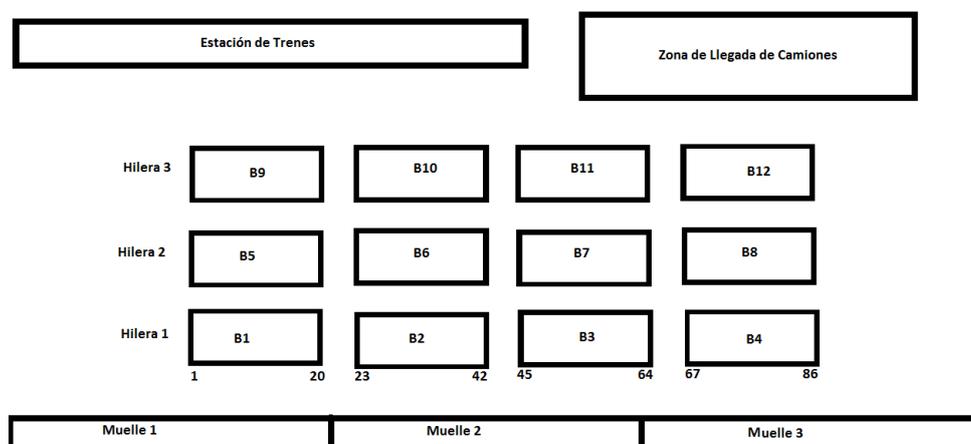


Figura 25: Mapa de la distribución del puerto de contenedores simulado en Arena.

Dentro de los bloques de contenedores de la zona de almacenamiento, existen una serie de grúas RTG que se encargan de las tareas de carga y descarga. En los bloques, la simulación también se encarga de la búsqueda y selección de grúas para realizar las diferentes tareas. La lógica de selección se basa en una búsqueda de una grúa tanto a la izquierda como a la derecha de la posición dónde se debe llevar a cabo la tarea en cuestión. Una serie de variables se encargan de buscar una RTG posición a posición a la izquierda y derecha del lugar dónde se encuentra la tarea. Una vez se encuentran estas dos grúas, a la izquierda y a la derecha, se comparará el tiempo que tardaría cada una de ellas en atender a esta tarea. Este tiempo se calcula en función de la distancia a recorrer por cada grúa hasta alcanzar la posición de la tarea, y en función de la cola de tareas por procesar que tiene cada grúa. Una vez realizada esta comparación de tiempos, la tarea pasa a la cola de tareas de la grúa con menor tiempo de espera. También se ha tenido en cuenta que la selección de grúas que se hace dentro de una hilera, es independiente a las otras dos. Esto se ha hecho al considerar que las grúas RTG no se mueven entre hileras para evitar obstaculizar las labores del puerto. Ya que estos movimientos se realizarán de manera muy escasa o en momentos de muy poca actividad dentro del puerto.

Esta lógica de selección permite la búsqueda de la grúa más eficiente de manera que se reduzca el tiempo de espera tanto de barcos, trenes o camiones. Sin embargo, se han considerado una serie de restricciones que simulan las restricciones físicas que existen en la realidad. En primer lugar, se ha tratado con la interferencia entre grúas. Esto es que si existe una grúa 1 entre una grúa 2 y una tarea a realizar, la grúa 2 no puede ser asignada para realizar esta tarea porque físicamente se lo impide la grúa 1. Es por ello, que a la hora de realizar la búsqueda de RTGs libres para realizar una tarea, si entre la RTG libre y la tarea existe otra grúa, la grúa libre quedará automáticamente descartada para realizar dicha tarea. Además, se ha considerado, que en cada bloque de contenedores sólo pueden llegar a estar un máximo de dos grúas. Esta restricción se ha considerado para evitar la saturación de los bloques con grúas y evitar el movimiento excesivo de grúas en la zona de almacenamiento. Finalmente, se ha considerado, que cada vez que llegue un buque o un tren, las tareas de carga y descarga pueden realizarse simultáneamente.

Una vez explicadas las características de las tareas y del puerto, se explicará la llegada de buques, trenes y camiones. Existen tres llegadas, una de buques, una de trenes y otra de camiones. Una vez entran en la simulación, los buques, trenes o camiones, esperarán a salir de la simulación una vez se hayan atendido todas sus tareas. De esta manera, se podrá controlar el tiempo de espera de cada uno de los medios de transporte. Las tres llegadas simulan la llegada de estos tres medios de transporte. Para ello, se ha utilizado un módulo Create que crea una entidad en el instante inicial de la simulación. Esta entidad se utiliza para leer los datos de entrada junto con la ayuda de un módulo Read and Write. Este módulo nos permite leer unos ficheros de Excel que contienen la información acerca de la llegada de los buques, trenes y camiones. Se utiliza un Excel distinto para cada una de las llegadas. La lectura de datos se realiza así ya que, como se ha mencionado anteriormente, el puerto tiene información previa sobre la llegada de buques y trenes.

Esta diferencia entre los Excel se debe a la lógica de la simulación. En primer lugar, los buques y los trenes, como ocurre en la realidad, traen más de un contenedor, o como se llaman en esta simulación tareas, cada vez que llegan a un puerto. En cambio, los camiones traen tareas de una en una, ya sean de carga o de descarga. Por otro lado, en esta simulación se ha considerado que los buques pueden llegar a tres muelles distintos, cada uno de ellos con cuatro secciones. Cada

sección, de su respectivo muelle, puede seleccionar hasta dos grúas que se encarguen de cargar o descargar el buque. Mientras tanto, tanto la llegada de trenes como de camiones sólo tienen una posible zona de llegada.

Una vez explicadas estas características de las zonas de llegada, se pasa a explicar los Excels de llegada de buques, trenes y camiones. En el caso de los buques, la llegada de los buques se define con la hora de llegada del buque al puerto, el número de contenedores, o tareas, que trae, y el muelle en el que va a atracar. Para los trenes, la información relativa a su llegada simplemente incluye la hora de llegada al puerto y el número de contenedores. En el caso de los camiones, como cada uno trae una única tarea, la información será directamente el tiempo de llegada, el tipo de tarea, ya sea carga o descarga, el bloque y la posición dentro de ese bloque.

El siguiente paso para entender la lógica de la simulación es explicar la solicitud de RTGs para atender a las tareas de los buques y trenes. Estas solicitudes se controlan con Excel diferentes para los buques y trenes. La solicitud sirve para lanzar una petición de una RTG en la posición del bloque dónde se va a realizar una tarea del buque o tren. Se lanza una solicitud en una posición un tiempo pequeño antes de que llegue el buque o tren al puerto. De esta manera, comienza la búsqueda y selección de las RTG para atender a estas tareas. Una vez encontradas, las tareas del buque se colocan en la cola de la RTG. De esta manera, una vez llega el buque o tren, ya están una o dos RTGs colocadas en la posición necesaria para atender a estas tareas.

Estas solicitudes se realizan debido a que buques y trenes traen una gran cantidad de tareas y de esta manera se pueden atender más eficientemente y reducir sus tiempos de espera. Además, los buques y los trenes llegan de manera más intermitente, al contrario de camiones que llegan de forma continua a lo largo del día. Además, las tareas de cada buque o tren se centrarán en uno, dos o tres bloques. De esta manera, aunque se centran recursos para atender a un gran volumen de tareas en un corto espacio de tiempo, se puede seguir atendiendo al pequeño volumen de trabajo que traen los camiones de forma constante. La información que traen los Excel de solicitudes es un tiempo previo a la llegada de los buques o trenes, el bloque y la posición de cada una de las tareas a la que se debe dirigir cada RTG.

Una vez realizada la solicitud de RTGs, se debe realizar la lectura de tareas para buques y trenes. Esta acción también se realizará con otro módulo Read and Write y un nuevo tipo de Excel. En ambos casos, el Excel incluirá el bloque, la posición de la tarea y la sección, en el caso de los buques. Además, se ha incluido un dato más en el Excel que indica la última tarea que debe realizar dicha grúa. Este dato sirve para evitar que las RTGs que están atendiendo al buque o tren en un bloque específico puedan ser llamadas por otras tareas ajenas al tren o buque y así maximizar la eficiencia y reducir los tiempos de espera.

Para concluir la explicación del Arena, se deben mencionar las salidas de la simulación. Primero, existirá un tipo de salidas para los buques, trenes o camiones que ya han sido atendidos en su totalidad. Por otro lado, existe una salida para las tareas ya atendidas. Y por último, existe una salida para las señales que se encargan de las búsquedas de RTGs dentro de la zona de almacenamiento.

7. Estudios Realizados

Una vez creado el modelo del puerto en el simulador Arena, se han realizado una serie de ensayos para determinar resultados de relevancia dentro del puerto. Estos resultados se determinan con el objetivo de obtener un funcionamiento más eficiente dentro del puerto en las operaciones de carga y descarga, centrándose en particular, en las operaciones de las RTGs en la zona de almacenamiento de contenedores del puerto.

7.1. Estudio 1: Comparativa de las distribuciones de carga y descarga en la zona de almacenamiento.

Para comenzar, se ha realizado un primer estudio que trata de determinar que distribución es más eficiente a la hora de realizar la carga y la descarga dentro del puerto. Para ello, se realiza la carga y la descarga de una serie de tareas dentro del puerto con cuatro distribuciones diferentes a la hora de realizar cada tipo de tarea. Cada distribución se caracterizará por realizar la carga y la descarga en distintas áreas de la zona de la explanada. Las distribuciones son las siguientes:

1. Distribución 1: Descarga en bloques más cercanos a los muelles y carga en los bloques más alejados.
2. Distribución 2: Descarga en bloques más alejados a los muelles y carga en los bloques más cercanos
3. Distribución 3: Descarga en los bloques de la parte izquierda de la zona de almacenamiento y carga en los bloques de la parte derecha.
4. Distribución 4: Descarga en los bloques de la parte derecha de la zona de almacenamiento y carga en los bloques de la parte izquierda.

Dentro del puerto, se ha considerado que los bloques más cercanos al puerto son los pertenecientes a la hilera 1, bloques del 1 al 4, y los más alejados los bloques pertenecientes a la hilera 3, bloques del 9 al 12. Por otro lado, los bloques de la parte izquierda se han considerado los bloques 1, 2, 5, 6, 9 y 10, mientras que los bloques de la parte derecha son 3, 4, 7, 8, 11 y 12. En las figuras 27 y 28 se muestran unos mapas que reflejan la lógica de las distintas distribuciones.

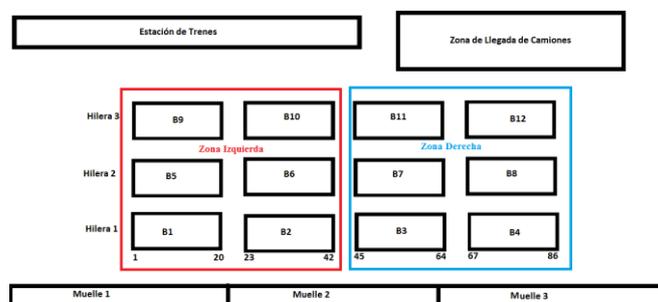


Figura 26: Distribución izquierda y derecha de la zona de almacenamiento



Figura 27: Distribución de la zona alejada y la zona cercana dentro de la zona de almacenamiento.

El objetivo de este estudio es ver cuál de las cuatro distribuciones es más eficiente a la hora de realizar las operaciones de carga y descarga del puerto. Para comprobarlo, se verá el tiempo medio de espera de buques, trenes y camiones desde que llegan al puerto hasta que salen de él con todas las operaciones realizadas. Además, se observarán los tiempos de carga y descarga para cada una de las distribuciones. Junto a estos resultados, se observarán las operaciones de cada una de las grúas RTG que trabajan dentro del puerto. Finalmente, se tendrá en cuenta el tiempo que están solicitadas las cabezas tractoras que desplazan los bloques desde cada una de las zonas de recepción del puerto (muelles, estación de trenes y zona de llegada de camiones) a la zona de almacenamiento de contenedores.

En este estudio, se han tenido en cuenta una serie de suposiciones a la hora de realizar cada una de las simulaciones.

- Para comenzar, se ha utilizado los mismos datos de entrada para los Excels de lectura del puerto. Esto supone que para cada una de las distribuciones se han utilizado los mismos volúmenes de carga y descarga. Para ello, se han introducido la llegada de 4 buques, 3 trenes y 150 camiones, todos con el mismo número de tareas a procesar para cada una de las distribuciones. Por ejemplo, el buque 1 tiene el mismo número de contenedores para las cuatro distribuciones. Como ocurre con el resto de buques y trenes. Igualmente, las horas de llegada serán las mismas para los tres tipos de medios de transporte.
- En segundo lugar, las RTGs, las cabezas tractoras y las grúas pódico trabajarán con la misma eficiencia o ritmo de trabajo en cada una de las distribuciones.
- Otro aspecto que se considera como constante para cada uno de los casos, es el número de grúas RTG que trabajan dentro de la zona de almacenamiento. Para este estudio, se han utilizado un total de 18 RTGs funcionando en los 12 bloques. Sin embargo, en este modelo de simulación, las RTGs trabajan por hileras ya que se considera que los movimientos de las grúas entre hileras, en la realidad, son escasos y se suelen realizar en momentos de mayor inactividad del puerto para evitar interferencias. Es por ello que cada hilera tendrá 6 RTGs trabajando para cada uno de los 4 bloques pertenecientes a ella. Las grúas RTG 1 a 6 trabajan en la hilera 1, las 7 a 12 trabajan en la hilera 2 t las grúas 13 a 18 en la hilera 3.
- Finalmente, para las cuatro distribuciones, se ha simulado un tiempo de 24 horas con el objetivo de reflejar un día de funcionamiento del puerto.

7.1.1. Recogida de Resultados:

A continuación se listan los resultados obtenidos en cada una de las distribuciones:

Tiempos de espera de los buques:

A continuación se muestran los gráficos 7, 8, 9 y 10 de los tiempos de espera de cada uno de los cuatro buques en cada una de las cuatro distribuciones. Dentro del gráfico se observa en el eje horizontal el tiempo en minutos de la simulación. Este transcurre de 0 a 1440, al simular un día completo. En el eje vertical se encuentra el tiempo que medido en minutos que transcurre desde que el buque entra en el puerto, hasta que este sale. Estos gráficos no muestran el momento de llegada. Sin embargo, sí muestran el instante de salida y el tiempo en que el buque ha estado dentro del puerto. Cada línea representa uno de los cuatro buques. Cada línea aparece en un punto del eje horizontal, indicando el tiempo en el que sale el buque del puerto cuando sus tareas han finalizado. Por otro lado las líneas serán más o menos alargadas en función del tiempo en minutos que cada buque se encuentra dentro del puerto. Las líneas representan a los buques 1, 2, 3, y 4 contando de izquierda a derecha. Cada buque es independiente del resto. Por ejemplo, el buque 1 sale del puerto en el minuto 570 y ha estado dentro de este unos 205 minutos.

Como se puede observar, en las cuatro distribuciones, los buques tardan el mismo tiempo en salir del puerto y salen a la misma hora. Esto demuestra, que en las cuatro distribuciones los recursos se han centrado para atender a los buques de manera similar y es por ello que todos tienen los mismos tiempos. Esto se debe a que en los momentos previos a la llegada de cada buque se lanza una solicitud para colocar dos grúas RTG en las posiciones de los bloques dónde se van a centrar las tareas de carga y descarga del buque.

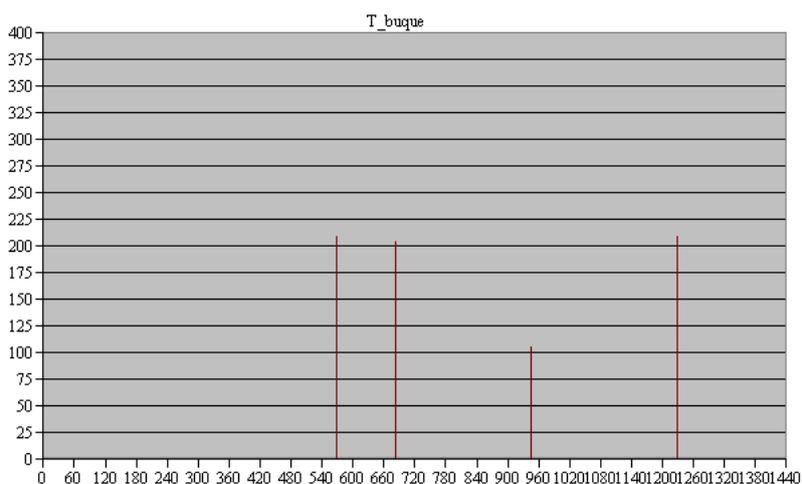


Gráfico 7 Tiempo espera de los buques en Distribución 1

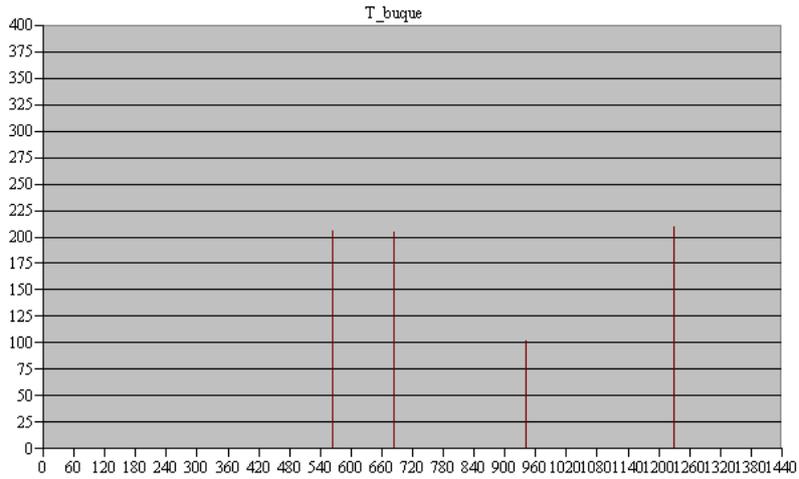


Gráfico 8 Tiempo espera de los buques en Distribución 2

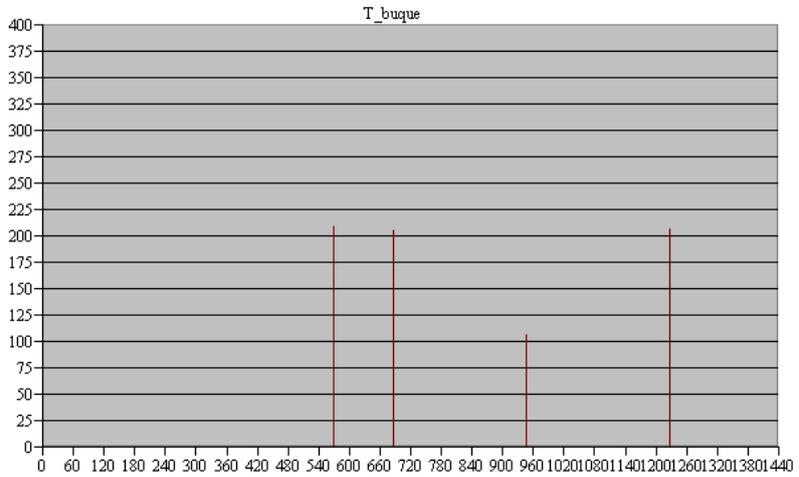


Gráfico 9 Tiempo de espera de los buques en Distribución 3

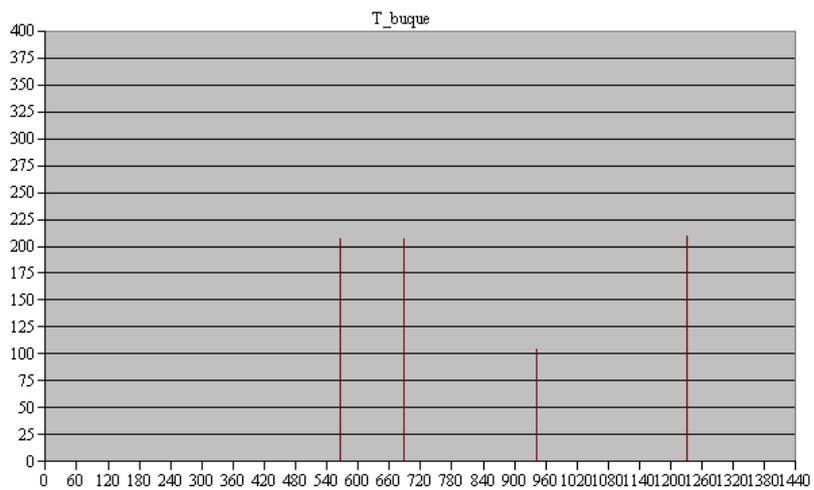


Gráfico 10 Tiempo de espera de los buques en Distribución 4

Tiempo de espera de los trenes

Los gráficos 11, 12, 13 y 14 muestran los tiempos de espera de cada uno de los tres trenes que se muestran en la simulación. Como se ha comentado previamente, en esta simulación se han introducido tres trenes que llegarán a lo largo del día simulado. Como en el caso de los buques, estos gráficos muestran en el eje horizontal el tiempo transcurrido, de 0 a 1440 por ser un día completo. Mientras tanto, el eje vertical muestra el tiempo transcurrido desde que cada tren entra en el puerto hasta que sale. Ambos ejes medidos en minutos. Como se puede observar, en las cuatro distribuciones los tiempos de espera de los trenes son los mismos. El primer tren se va al principio de la simulación, debido a que ha llegado temprano, mientras que los trenes 2 y 3 se van cuando la simulación está llegando a su fin ya que son trenes que han llegado en momentos más tardíos.

La similitud de tiempos entre las cuatro distribuciones, se debe una vez más a que en los momentos previos a la llegada de los trenes, se manda una solicitud para colocar una grúa en la posición dónde se van a realizar las tareas de cada tren. Esto permite que los trenes salgan con el menor tiempo de espera posible. Además, esta similitud de tiempos, tanto en buques como en trenes, demuestra que este modelo centra sus recursos en estos dos tipos de medios de transporte sea cual sea la distribución.

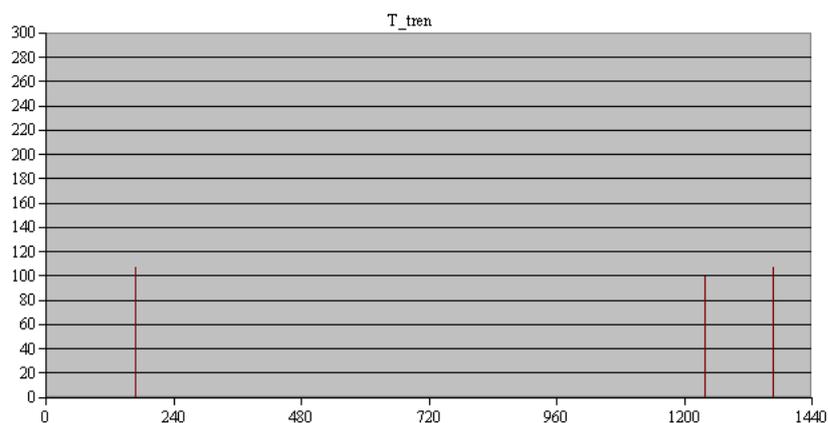


Gráfico 11 Tiempo espera Trenes en Distribución 1

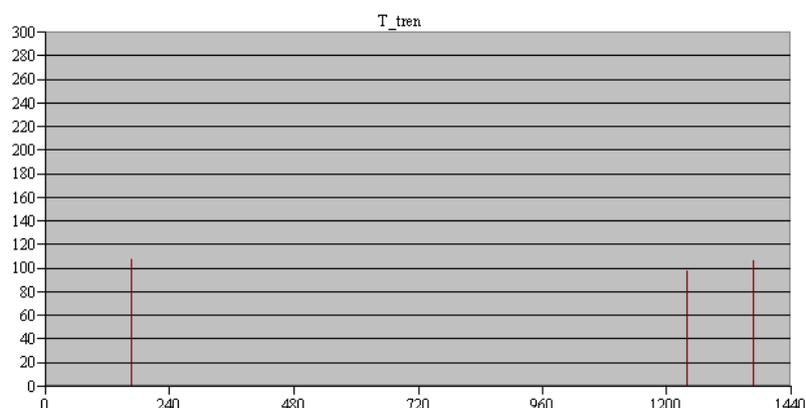


Gráfico 12 Tiempo espera Trenes en Distribución 2

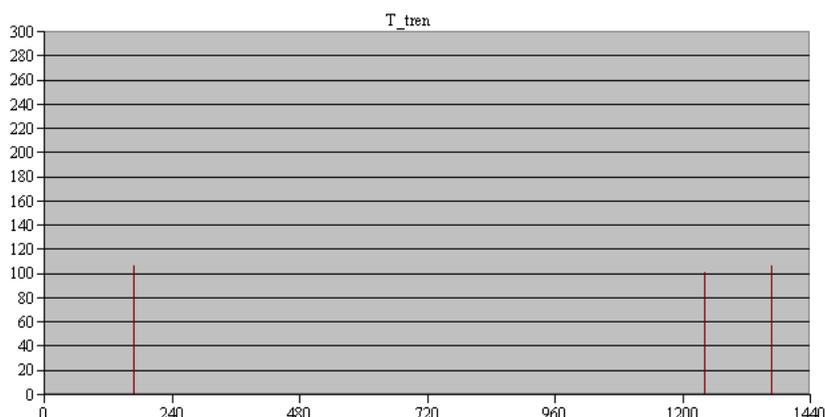


Gráfico 13 Tiempo espera Trenes en Distribución 3

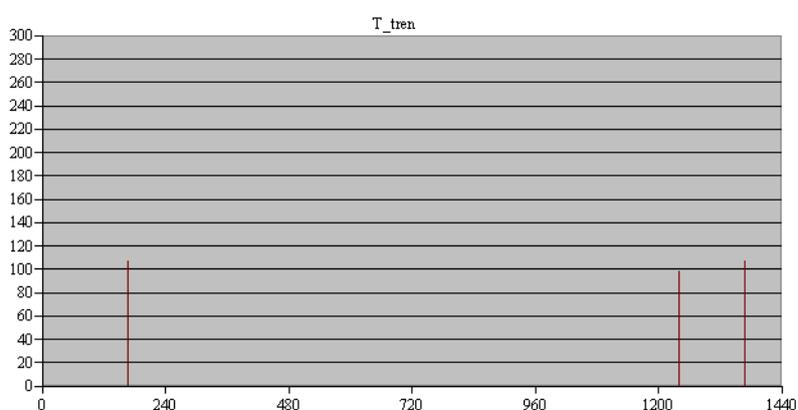


Gráfico 14 Tiempo espera Trenes en Distribución 4

Tiempo de espera de los camiones

En los gráficos 15 al 18 se muestran los tiempos de espera de cada uno de los camiones que han entrado dentro del puerto. Al igual que los gráficos de tiempo de espera de buques y tiempo de espera de camiones, el eje horizontal representa el tiempo transcurrido de la simulación. Igualmente, el eje vertical muestra el tiempo que cada camión está dentro del puerto.

Como en el caso de buques y trenes, cada línea representa un camión, en el caso de camiones, hay 150 camiones. Las líneas de menor longitud, se deben a que ese camión en cuestión ha estado un tiempo pequeño dentro del puerto. En el caso contrario, las líneas más largas muestran que ese camión ha estado dentro del puerto más tiempo hasta que ha finalizado su tarea, su tiempo de espera es mayor. Esta diferencia en los tiempos se debe a que unos camiones han sido atendidos por una grúa con mayor rapidez que otra. Esta diferencia en la atención de cada camión se debe a varios factores.

Primero, para los camiones no se manda una solicitud previa a la llegada de este ya que la llegada de camiones es muy constante y cada poco tiempo, lo que complicaría mucho el trabajo de las RTG. Esto provoca que aunque la grúa más cercana esté libre, esta se tenga que desplazar hasta el punto dónde se encuentra la tarea del camión. Por otro lado, las tareas de los camiones

pueden pasar a ponerse en cola de una RTG que ya está ocupada, de ahí que aumente el tiempo de espera de ese camión. Finalmente, se puede dar el caso que las grúas más cercanas, se encuentren trabajando en tareas de un buque o un tren. Todas estas tareas llegan a la vez, lo que provoca que las RTG que trabajan con ellas, se ven de repente con una cola de espera bastante amplia. Por lo tanto, el camión debe esperar a que todas estas tareas finalicen hasta que la suya pueda ser atendida. En los gráficos 15, 16 y 18, se puede observar que en las distribuciones 1, 2 y 4 respectivamente los tiempos de espera de los camiones son similares. Sin embargo, el gráfico 17, muestra como en el gráfico 17 existe un pico muy importante en los tiempos de espera de los camiones. A continuación, se mostrará en la tabla 11 los tiempos medios de espera de los camiones, que ayudarán a comprender mejor la situación en cada una de las distribuciones.

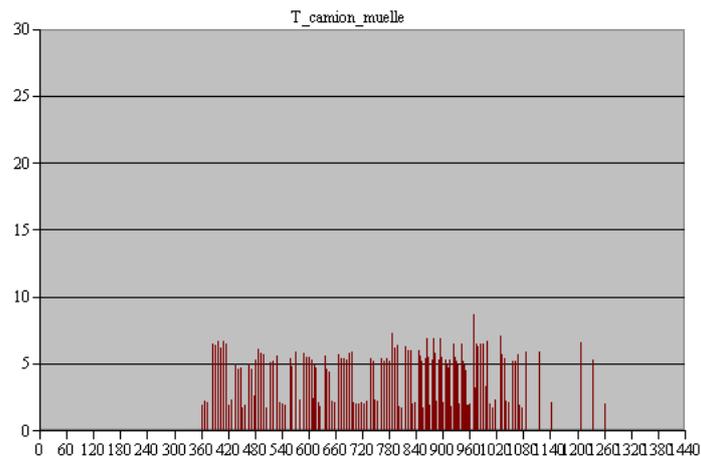


Gráfico 15 Tiempo espera de camiones en Distribución 1

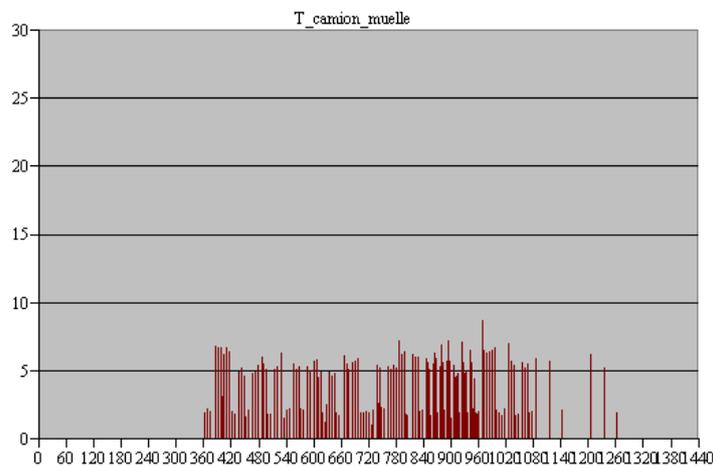


Gráfico 16 Tiempo espera de camiones en Distribución 2

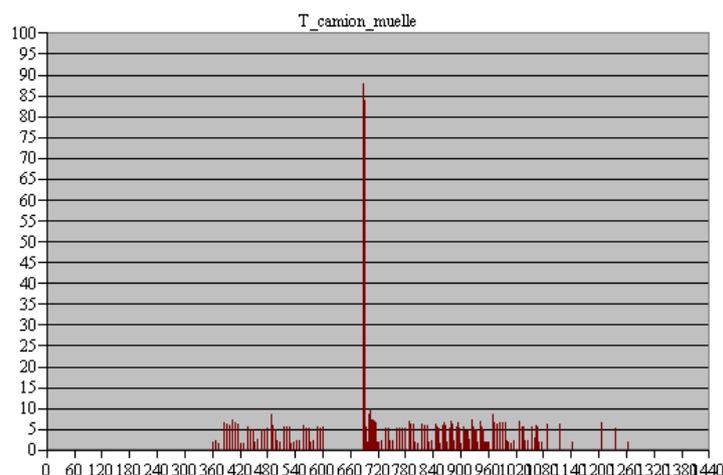


Gráfico 17 Tiempo espera de camiones en Distribución 3

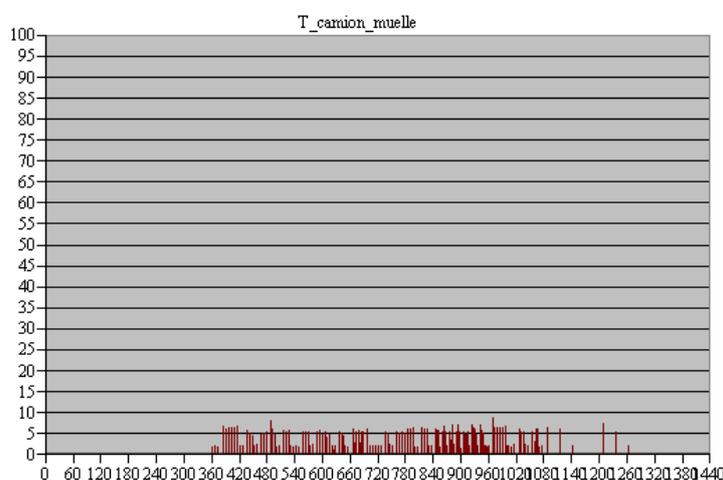


Gráfico 18 Tiempo espera de camiones en Distribución 4

La tabla 11 muestra los tiempos medios de espera de los camiones en cada una de las distribuciones. Los resultados colocan a la distribución 1 con el menor tiempo de espera, con 4,20 minutos de media, mientras que la distribución 3 tiene el tiempo de espera de camiones mayor, con 6 minutos de espera de media. Esta gran diferencia en la distribución 3 con respecto a las otras tres, se puede explicar con el gráfico 17. En este gráfico se observa que para unos pocos camiones el tiempo de espera es muy superior al resto. Esto se debe a que el camión tarda en ser atendido mucho tiempo por una RTG. Como se explicó anteriormente, las RTGs más cercanas podrían estar saturadas debido a la carga de tareas a la que le obliga las llegadas al puerto junto con la distribución a la que es sometida la zona de almacenamiento.

	Tiempo medio de espera de camiones (min)
Distribución 1	4,20
Distribución 2	4,22
Distribución 3	6,00
Distribución 4	4,25

Tabla 10 Tiempos medio de espera de los camiones.

Tiempos de las tareas de descarga

Los gráficos 19, 20, 21, y 22 que se observan a continuación muestran los tiempos de las tareas de descarga de cada una de las tareas de descarga de la simulación. El eje horizontal muestra el tiempo de la simulación, de 0 a 24 horas. Por otro lado, el eje vertical muestra el tiempo que se tarda en realizar cada tarea de descarga. En los gráficos de tiempos de tareas de descarga, 19 al 22, se muestran las tareas de descarga pertenecientes a los tres tipos de medios de transporte, buques, trenes y barcos.

En los gráficos se pueden observar picos debido al aumento de los tiempos de descarga de cada tarea. Además las zonas donde existen mayor número de líneas se debe a que en esos momentos de la simulación, se han realizado más tareas de este tipo. En el caso contrario, en las zonas donde se ven menos congestión de líneas, se puede apreciar que hay menor número de tareas de descarga en esos momentos de la simulación. En los cuatro gráficos, se puede ver que los tiempos de descarga son similares, sin embargo, se puede apreciar que no son exactamente iguales como era el caso de los trenes y los buques. Es por ello que más adelante se mostrará en la tabla 12 los tiempos medios de descarga para cada una de las distribuciones para facilitar el estudio de estos gráficos.

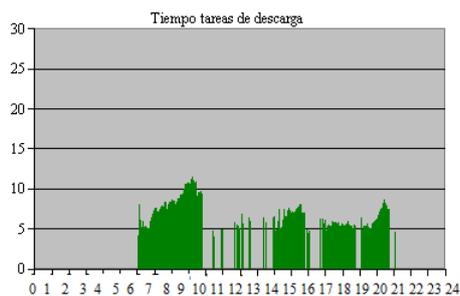


Gráfico 19 Tiempo tareas de descarga en Distribución 1

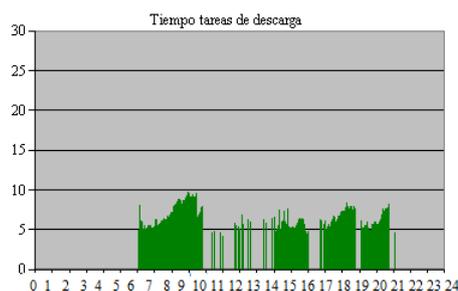


Gráfico 20 Tiempo tareas de descarga en Distribución 2

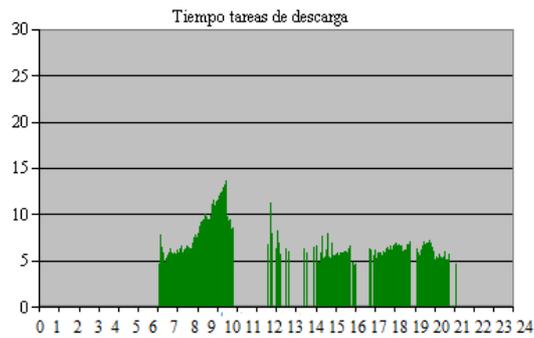


Gráfico 21 Tiempo tareas de descarga en Distribución 3

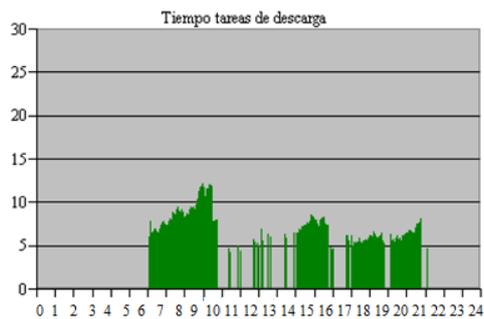


Gráfico 22 Tiempo tareas de descarga en Distribución 4

Tiempo de las tareas de carga

A continuación se muestran los gráficos 23, 24, 25 y 26 que reflejan los tiempos de carga de cada una de las tareas de carga del puerto. Estos cuatro gráficos son equivalentes a los gráficos 19, 20, 21 y 22 para las distribuciones 1, 2, 3 y 4, pero esta vez representando los tiempos de espera para las tareas de carga. Se puede apreciar que la situación de las líneas a lo largo del tiempo es diferente. Esto se debe a que las tareas de carga han llegado en momentos diferentes. Esto se puede apreciar en el tiempo que transcurre desde la hora 1 a la 3. En estos instantes se puede apreciar una concentración de tareas de carga. Esto se debe a que a esta hora llegó un tren al puerto con sólo tareas de carga y sin ninguna tarea de descarga. Por lo tanto, estos gráficos no sólo informan de los tiempos de espera de las tareas de carga, sino también para determinar en qué instantes hay mayor saturación de tareas dentro del puerto. Un ejemplo de saturación de tareas se puede apreciar entre las horas 6 y 9. Al igual que en los gráficos de tiempos de descarga, existen diferencias entre las cuatro distribuciones, como se puede apreciar por los picos y diferencia de longitudes que existen en los gráficos 23 al 26. Para poder analizar mejor estos gráficos, se reúne en la tabla 12, junto a los tiempos medios de descarga, los tiempos medios de carga para cada una de las distribuciones.

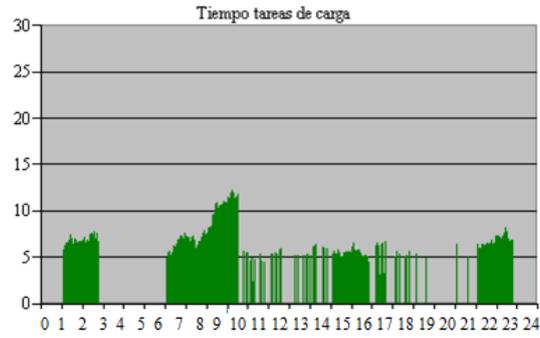


Gráfico 23 Tiempo tareas de carga en Distribución 1

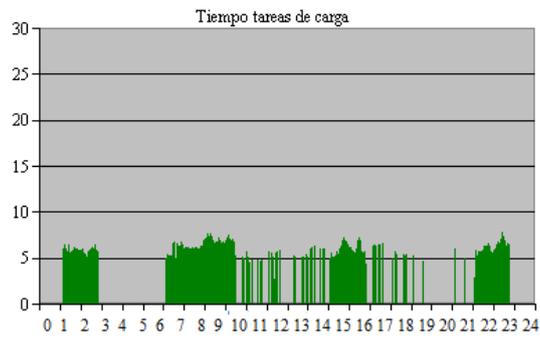


Gráfico 24 Tiempo tareas de carga en Distribución 2

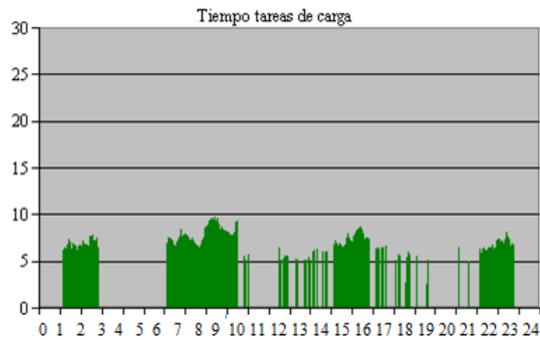


Gráfico 25 Tiempo tareas de carga en Distribución 3

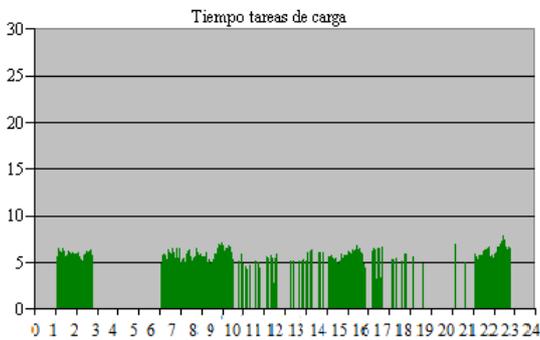


Gráfico 26 Tiempo tareas de carga en Distribución 4

A continuación se muestra un resumen de los tiempos de carga y descarga en la tabla 12. Esta tabla muestra los tiempos medios de carga y descarga de las cuatro distribuciones. Como se puede observar, el tiempo más bajo de descarga se da con la distribución 2 mientras que el

tiempo más alto con la distribución 4. Por otro lado, el mejor tiempo de carga se da con la distribución 4 y el peor con la distribución 3. El aumento en los tiempos medios para ambos casos, se puede apreciar en los gráficos que tienen grandes picos en los tiempos de carga o descarga. Esto ocurre para la distribución 4 en los tiempos de descarga y en la distribución 1 en los tiempos de carga. Además, este aumento de tiempos medios coincide con que las líneas de los gráficos tengo una longitud mayor en general que el resto de distribuciones. Un ejemplo se puede ver al comparar los tiempos de carga de la distribución 3 con los de la 4. A pesar que en la 3 no existen grandes picos, en general se puede apreciar en general los tiempos de espera son mayores. Esta diferencia entre los tiempos medios de carga y descarga, se debe claramente a las tareas asociadas a los camiones. Este hecho se refleja a que, como se ha explicado anteriormente, los tiempos de espera de los camiones variaban entre las cuatro distribuciones. Por otro lado, se observó y comentó anteriormente que los tiempos de espera de buques y trenes fueron muy similares para las cuatro distribuciones.

	Tiempo medio descarga (min)	Tiempo medio carga (min)
Distribución 1	6,35	6,52
Distribución 2	6,08	6,15
Distribución 3	6,14	6,70
Distribución 4	6,70	6,02

Tabla 11 Tiempos medios de descarga y carga para cada una de las distribuciones

Tiempo Solicitud de las cabezas tractoras

Los gráficos 27, 28, 29 y 30 muestran los tiempos que están solicitadas las cabezas tractoras a lo largo de la simulación. Como se explicó anteriormente, las cabezas tractoras son las encargadas de transportar los contenedores dentro de la terminal. Estos gráficos muestran el tiempo transcurrido, eje horizontal, frente al tiempo que están solicitadas las cabezas tractoras. Al igual que en las tareas de carga y descarga se puede apreciar el tiempo de mayor concentración de solicitudes, por la concentración de líneas. Además, una vez más, la longitud de las líneas reflejan el tiempo que cada cabeza tractora ha estado solicitada hasta que ha sido liberada para encargarse de otra tarea. En los gráficos 27, 28 y 30 se observan unos tiempos de solicitud similares para las distribuciones 1, 2 y 4. Sin embargo, en el gráfico 29, se aprecia un pico importante debido a un tiempo muy largo de solicitud de una cabeza tractora en la distribución 3. Este pico demuestra que una tarea ha tardado mucho en ser atendida y por lo tanto la cabeza tractora ha tardado más en liberarse. Probablemente, la cabeza tractora llevase una tarea de carga, ya que en la distribución 3, los tiempos medios de las tareas de carga son muy altos. Además, en esta misma distribución, el tiempo medio de espera de camiones es muy superior al resto, como se muestra en la tabla 11. Este hecho demuestra que el tiempo de solicitud de las cabezas tractoras, los tiempos de carga y descarga y los tiempos de espera están directamente relacionados.

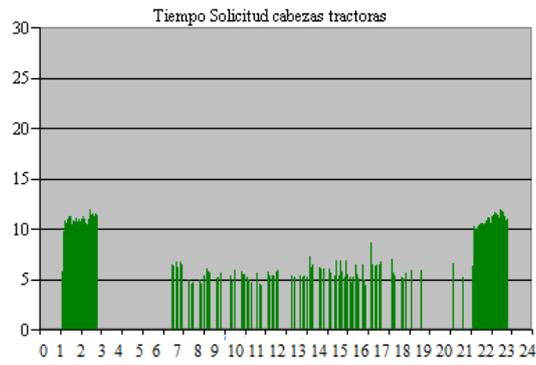


Gráfico 27 Tiempo solicitud cabezas tractoras en Distribución 1

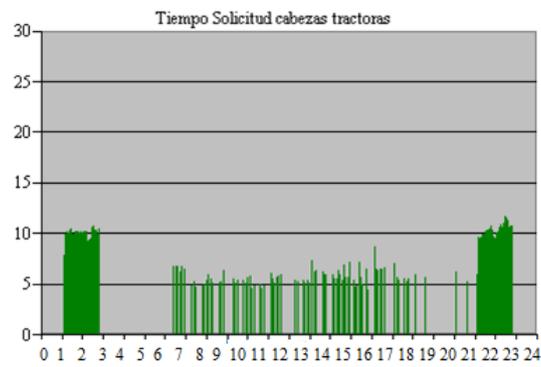


Gráfico 28 Tiempo solicitud cabezas tractoras en Distribución 2

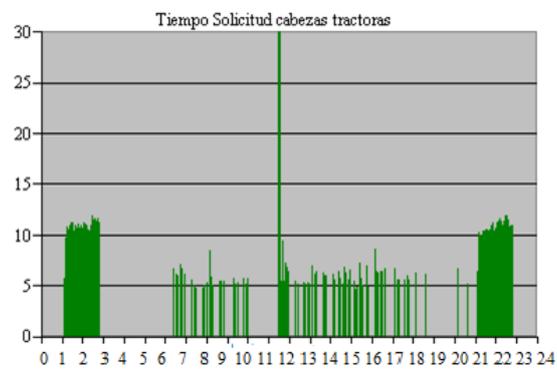


Gráfico 29 Tiempo solicitud cabezas tractoras en Distribución 3

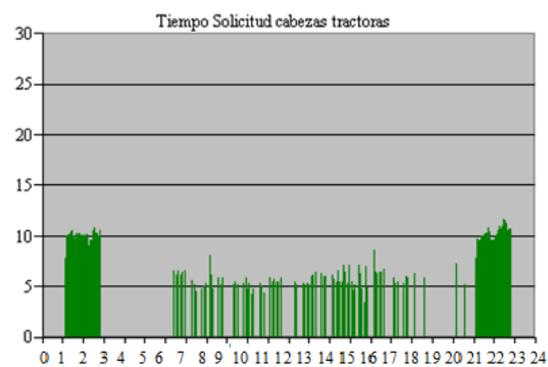


Gráfico 30 Tiempo solicitud cabezas tractoras en Distribución 4

Control del funcionamiento de las RTG

A continuación se muestran los gráficos de las tareas atendidas por hora de cada RTG y el número de desplazamientos realizados por hora de cada una de las RTG. Debido a la gran cantidad de gráficas que incluye cada una de las distribuciones (36 por cada distribución), se presentan las gráficas de resultados de este apartado sólo de la distribución 1 y se presenta una tabla resumen de las cuatro distribuciones.

En los gráficos de las tareas atendidas por cada RTG se puede observar el número de tareas realizadas cada hora por cada RTG, de la 1 a la 18. Por otro lado, los gráficos de desplazamientos, muestran el número de desplazamientos realizados por cada RTG en cada hora. Estos gráficos, permiten determinar el nivel de ocupación de cada RTG en unos instantes determinados.

Por ejemplo, como se observa en los gráficos 31 y 32, para la distribución 1 la RTG1 no tiene ningún tipo de carga hasta la hora 9 donde debe realizar un desplazamiento para atender durante la hora 10 a más de 25 tareas. Hasta la hora 13 está realizando desplazamientos que llegan como máximo a desplazamientos de 3 posiciones por hora y atendiendo un máximo de 30 tareas. A partir de la hora 18, la RTG1 no realiza ninguna tarea. Se ha considerado que las grúas con un nivel de carga como la RTG1 que llegan a realizar más de 20 tareas en algunas horas de funcionamiento y realizan hasta 3 desplazamientos en sus horas de trabajo, son RTGs con alta carga de trabajo. Este es el caso de las RTGS 1, 2, 5, 6, 13, 14, 17 y 18, que tienen una alta carga de trabajo durante la simulación en la distribución 1. En la tabla 13, se puede apreciar que estas grúas están clasificadas como grúas de alta carga de trabajo en la distribución 1.

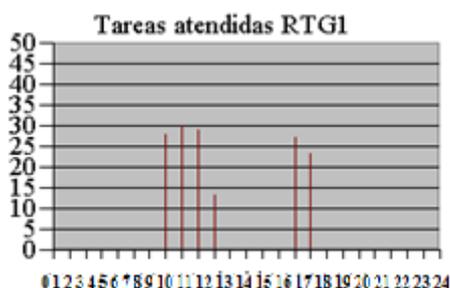


Gráfico 31 Tareas atendidas por hora por la RTG1 en la Distribución 1

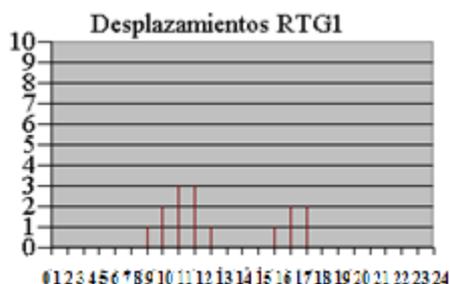


Gráfico 32 Número de desplazamientos por hora RTG1 en la Distribución 1

Un caso extremo se encuentra con la RTG3, que en la distribución 1 no realiza ninguna tarea y no realiza ningún desplazamiento. Este hechos se puede apreciar en los gráficos 33 y 34, donde

el número de tareas realizadas y el número de desplazamientos realizados por la RTG3 no toma ningún valor durante la simulación. De esta manera, se puede apreciar que la grúa RTG3 permanece ociosa durante toda la simulación en la distribución 1. Esto significa que la grúa RTG no ha sido requerida durante la simulación, por lo que para atender este volumen de carga en este espacio de tiempo no es necesaria. Esto mismo ocurre con las RTGs 4, 9, 12, 15 y 16, todas permanecen ociosas sin realizar ninguna tarea durante la simulación utilizando la distribución 1. En la tabla 13 se han clasificado estas grúas RTG como ociosas en la distribución 1.

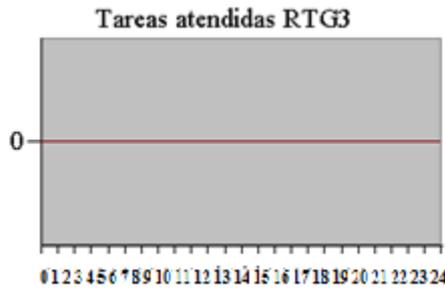


Gráfico 33 Tareas atendidas por hora por la RTG3 en la Distribución 1

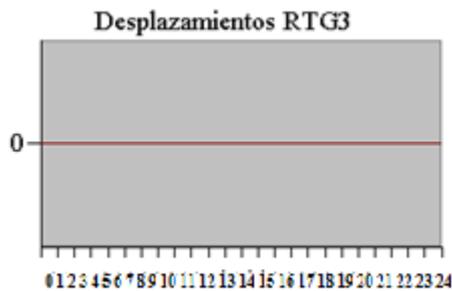


Gráfico 34 Número de desplazamientos por hora RTG3 en la Distribución 1

Finalmente, en los gráficos 35 y 36 muestran el nivel de trabajo de la grúa RTG7. Como se puede detectar de los gráficos, a pesar de realizar alguna tarea durante la simulación, su carga de trabajo no es muy alta. Este hecho se puede apreciar al observar que estas grúas realizan como máximo alrededor de 10 tareas por hora y unos pocos desplazamientos en las horas que están trabajando. Este mismo nivel de trabajo se puede observar en las grúas 8, 10 y 11.

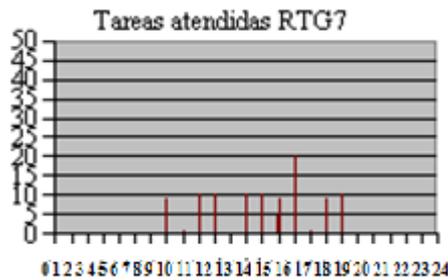


Gráfico 35 Tareas atendidas por hora por la RTG7 en la Distribución 1

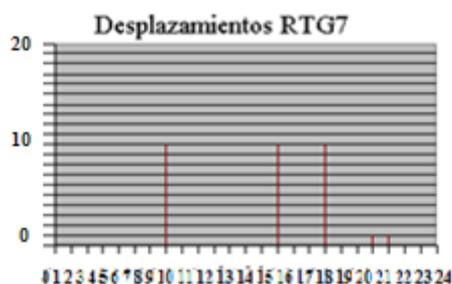


Gráfico 36 Número de desplazamientos por hora RTG7 en la Distribución 1

Al observar los gráficos de tareas realizadas por hora y desplazamientos realizados se puede observar el nivel de trabajo de cada una de las RTGs disponibles en la zona de almacenamiento del puerto. En el caso de la distribución 1, las grúas 3, 4, 9, 12, 15 y 16 se encuentran ociosas durante la simulación. Es decir, no realizan ninguna tarea. En caso contrario, las grúas 1, 2, 5, 6, 13, 14, 17 y 18 son las más saturadas. De esta manera se puede observar que hileras son las más saturadas. En el caso de la distribución 1, claramente las hileras 1 y 3 son las más saturadas. Lo que es lógico ya que se está centrando la descarga y la carga en los extremos. A continuación, se muestra en la tabla 13 el nivel de trabajo de las grúas para cada una de las distribuciones.

	Grúas Ociosas	Grúas con alta carga de trabajo
Distribución 1	3, 4, 9, 12, 15, 16	1, 2, 5, 6, 13, 14, 17, 18
Distribución 2	3, 4, 9, 12, 15, 16	1, 2, 5, 6, 13, 14, 17, 18
Distribución 3	3, 4, 15	1, 2, 5, 6, 8, 11, 12, 13, 14, 16, 17, 18
Distribución 4	3, 4, 15	1, 2, 5, 6, 8, 11, 12, 13, 14, 16, 17, 18

Tabla 12 Carga de trabajo de las grúas RTG en las cuatro distribuciones

En el caso de la distribución 2 las grúas ociosas y saturadas coinciden por las mismas razones que en la distribución 1. Por otro lado, en las distribuciones 3 y 4, sólo hay tres grúas ociosas, la 3, 4 y 15. Mientras tanto, el resto de grúas se encuentran con altas carga de trabajo en determinados momentos de la simulación. Claramente, las distribuciones 3 y 4 requieren un mayor número de RTGs para poder satisfacer la misma carga de trabajo que las distribuciones 1 y 2. Este hecho se refleja con que haya menos grúas ociosas en las distribuciones 3 y 4 que en las distribuciones 1 y 2.

7.1.2. Conclusiones:

Como se puede observar, en las cuatro distribuciones, los tiempos de espera de los buques son los mismos. Ocurre lo mismo con los tiempos de espera de los trenes. Esto se debe a que el modelo está diseñado de tal forma que se manda una solicitud previa a la llegada de barcos y trenes para colocar grúas RTG en las posiciones necesarias, antes de que llegue el buque o tren al puerto. Es una forma de centrar los recursos del puerto para maximizar la eficiencia del puerto.

Sin embargo, a la hora de observar los tiempos de espera de los camiones, los resultados no son los mismos. En el caso de las distribuciones 1, 2 y 3, los tiempos son todos homogéneos. Por

otro lado, en la distribución 3, existe un tiempo alrededor del minuto 690 en el que una serie de camiones tienen un tiempo de espera muy superior al resto. Observando los tiempos de solicitud de las RTG, se observa que en esa franja de tiempo existe también una serie de cabezas tractoras con unos tiempos muy superiores al resto también. Este aumento drástico de tiempo se debe a que la cabeza tractora se queda esperando a que una grúa RTG acuda a atender la tarea que trae consigo.

Esta espera se debe a que en la distribución 3 al realizarse en izquierda y derecha, se trabaja en bloques de distintas hileras. De esta forma, se puede llegar a realizar la carga y la descarga a la vez en una misma hilera. En otras palabras, un buque o un tren pueden estar descargando y cargando a la vez en bloques de una misma hilera. Para el caso de los buques y los trenes, esto no suele ser un problema ya que se suelen realizar las solicitudes previas como se ha mencionado antes. Sin embargo, en el caso de los camiones, al realizarse las tareas de carga y descarga de manera casi continua durante la simulación, no se realizan dichas solicitudes. De esta manera, al llegar la tarea a la posición donde debe ser atendida, a la hora de realizar la búsqueda de una RTG, se encuentra que estas están muy alejadas y debe esperar a que llegue, o en un peor caso, que estén ocupadas por buques o trenes y deba esperar a que estas terminen completamente con el buque o tren. Como consecuencia se encuentran estos aumentos drásticos de tiempo tanto en la espera de los camiones, como en los tiempos de espera de las cabezas tractoras.

Siguiendo con la observación de resultados, se pasa a comentar los tiempos medios de carga y descarga cada una de las distribuciones. En el caso de las distribuciones 1 y 2, el tiempo medio de descarga y carga no tienen una gran diferencia. Los resultados reflejan que la distribución 2 tiene unos tiempos medios mejores que la 1. Por otro lado, la distribución 3 tiene el tiempo de carga más alto. Sin embargo, el tiempo de descarga es el segundo mejor. Finalmente, la distribución 4 tiene simultáneamente el tiempo de descarga más alto y el tiempo de carga más bajo. Estos resultados muestran que las distribuciones 1 y 2 son más homogéneas en ambas tareas de carga y descarga, mientras que las distribuciones 3 y 4, muestran grandes diferencias entre la carga y la descarga.

Finalmente, los datos del número de tareas realizadas por hora por cada RTG y el número de desplazamientos realizados por hora de cada RTG dan información acerca de la carga de trabajo de cada una de las grúas. Por un lado, encontramos que existen hasta 6 grúas ociosas en las distribuciones 1 y 2, mientras que en las distribuciones 3 y 4 sólo existe 3 grúas sin ninguna carga de trabajo. Estos resultados muestran que las distribuciones 3 y 4 requieren más grúas que la 1 y la 2 para atender al mismo número de tareas.

En conclusión, aunque por un lado todas las distribuciones son capaces de atender a los cuatro buques y tres trenes y estos salen con los mismos tiempos de espera, existen una serie de resultados que inclinan la balanza a favor de una de las distribuciones. Por un lado, al observar los tiempos de espera de los camiones, se observa que la distribución 3 es la peor con una gran diferencia. Como ya se ha explicado, esto se debe a que deben esperar a las grúas que están atendiendo a otras tareas. Esto es debido a que al trabajar en bloques de izquierda y derecha, estos pueden coincidir en una misma hilera, colapsando grúas que trabajan en la misma hilera. Esta misma idea se observa con los tiempos de carga y descarga. En las distribuciones 3 y 4, existe una gran variedad entre los tiempos de carga y descarga. Por otro lado, las distribuciones 1 y 2 tienen tiempos más semejantes. Por último, se observa un mayor grado de utilización de las RTG para un mismo volumen de carga. Por lo tanto, se puede concluir que las distribuciones

1 y 2 son mejores que las distribuciones 3 y 4. Comparando las distribuciones 1 y 2, aunque los tiempos medios de camiones son muy casi similares, se puede observar que los tiempos de carga y descarga son mejores en la distribución 2.

Se concluye que la distribución 2 es la más eficiente al compararla con el resto con un mismo volumen de carga y la misma capacidad de trabajo. La distribución 2 tiene un tiempo medio de espera de camiones inferior hasta un 29,70% con respecto al peor tiempo medio. Además, tiene el tiempo medio de descarga y carga más bajo, siendo estos respectivamente un 9,25% y un 8,20% inferiores con respecto a los peores tiempos. Finalmente, al igual que para la distribución 1, requiere menos número de grúas que las distribuciones 3 y 4 para atender un mismo volumen de trabajo.

7.2. Estudio 2: Comparativa del número y distribución de RTGs en la zona de almacenamiento.

El segundo estudio que se realiza en este documento, es observar como varía la eficiencia del puerto en función del número de grúas disponibles dentro de la zona de almacenamiento y las distintas distribuciones. Para realizar este estudio, se variarán el número de grúas disponibles, además de las distribuciones de estas. Las distribuciones se harán por hilera, ya que las grúas de una hilera trabajan independientemente de las otras dos hileras. Las distribuciones son las siguientes, donde cada número representa el número de grúas RTG disponibles en cada hilera, yendo de hilera 1 a la 3.

- Distribución 1: 6-6-6
- Distribución 2: 5-5-5
- Distribución 3: 4-4-4
- Distribución 4: 3-3-3
- Distribución 5: 2-2-2
- Distribución 6: 2-3-2
- Distribución 7: 3-2-3
- Distribución 8: 3-4-3
- Distribución 9: 4-3-4
- Distribución 10: 5-3-5

El objetivo de este estudio es determinar qué número de grúas y que distribución es la más eficiente. Para comprobarlo, se verán los tiempos de espera de los buques, trenes y camiones dentro del puerto. Además, se observarán los tiempos de carga y descarga. Finalmente, se observarán los niveles de funcionamiento de cada una de las RTGs en función del número de tareas realizadas por hora y el número de desplazamientos realizados.

- Durante este estudio, se han tenido en cuenta una serie de suposiciones
- Primero, las llegadas, volumen de tareas y distribución de las tareas se mantienen constantes en cada uno de los ensayos. Es decir, se procesarán el mismo número de tareas y estas se llevarán a cabo en las mismas posiciones para cada una de las distribuciones de las RTG.
- Por otro lado, se supone el mismo rendimiento o nivel de funcionamiento para todas las RTG, cabezas tractoras y grúas pórtico.
- Finalmente, para todas las simulaciones se ha tomado un tiempo de simulación de 24 horas.

7.2.1. Recogida de resultados

A continuación se muestran los resultados obtenidos para cada una de las distribuciones diez distribuciones que se han descrito anteriormente:

Tiempo espera de los buques:

En los gráficos listados a continuación en esta sección de tiempo de espera de los buques, se muestran los tiempos de espera de los cuatro buques que entran en la simulación para cada una de las distintas distribuciones de grúas. Como se explicó en el estudio 1, para las 10 distribuciones, los gráficos de los tiempos de buque, representan el tiempo que el buque cada buque ha estado dentro del puerto hasta que todas sus tareas han sido gestionadas. De esta manera, se puede apreciar si en alguna distribución, algún buque ha tardado más en atenderse o si ha salido más tarde. Se puede observar que para las distribuciones 1, 2, 3, 7, 9 y 10 los tiempos de salida de los buques son los mismos. El gráfico 37 muestra para la distribución 1 los tiempos de espera de los cuatro buques. En este estudio, para las distribuciones 2, 3, 7, 9 y 10 se han obtenido gráficos idénticos de los tiempos de espera de los buques. Es por ello que se toma el gráfico de la distribución 1 a modo de ejemplo.

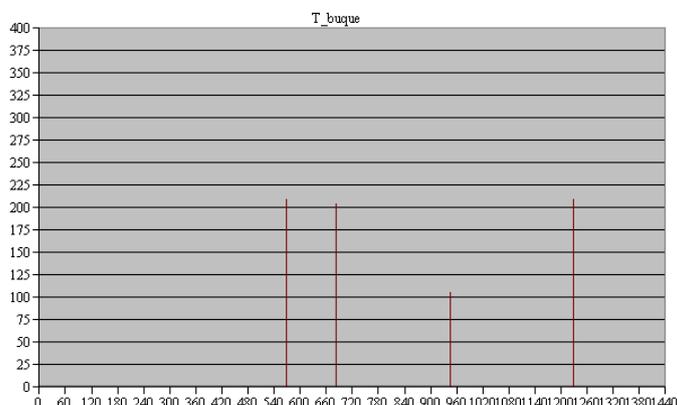


Gráfico 37 Tiempo espera buques en Distribución 1

Sin embargo, en las distribuciones 4 y 8, como muestran los gráficos 38 y 39, los tiempos de espera son superiores al resto para algunos buques. Se puede observar que los buques 1, 3 y 4 tienen tiempos de espera similares. Sin embargo, el tiempo de espera del buque 2 alcanza los 300 minutos, cuando en las demás distribuciones ronda los 200 minutos. Esto se puede deber a que las distribuciones 4 y 8, se han visto saturadas a la hora de atender a este buque en el momento en el que este ha llegado al puerto. Las grúas podrían estar trabajando en otras tareas en el momento que estas han sido solicitadas. De este modo, las tareas del buque se han visto obligadas a esperar que estas terminen con dichas tareas y que las grúas RTG se desplazasen a las posiciones necesarias. Teniendo como consecuencia este aumento en el tiempo de espera del buque 2.

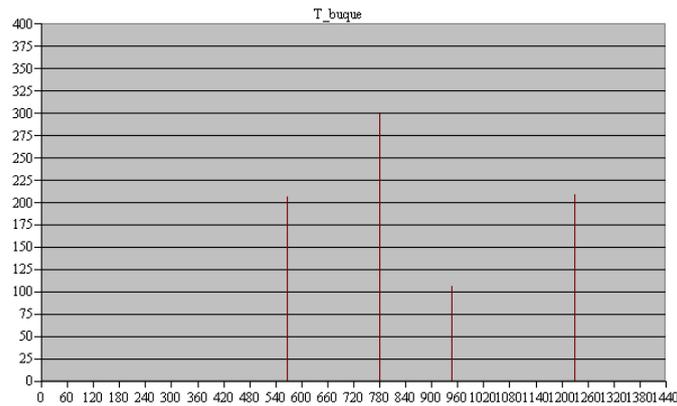


Gráfico 38 Tiempo espera buques en Distribución 4

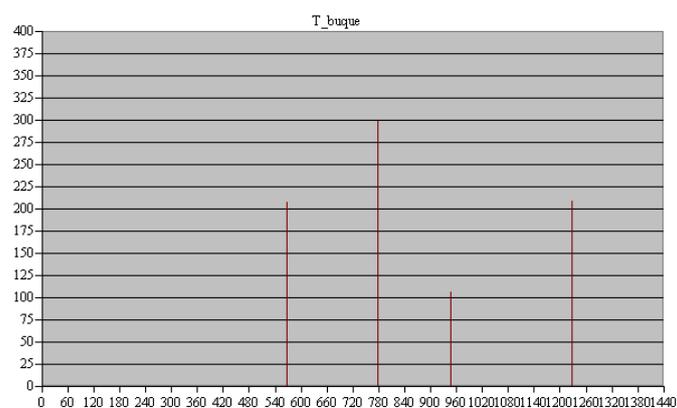


Gráfico 39 Tiempo espera buques en Distribución 8

Finalmente, en las distribuciones 5 y 6, como muestran los gráficos 40 y 41 sólo se consigue procesar al completo las tareas de los tres primeros buques, dejando al cuarto buque todavía sin salir una vez termina el día simulado. Estas variaciones en las distintas distribuciones, se debe a que el número de grúas no ha sido capaz de procesar todas las tareas del buque a tiempo, como es el caso de las distribuciones 5 y 6. O por otro lado, para el caso de las distribuciones 4 y 8, que al tener un número de grúas inferior, la realización de tareas ha sido más lenta y por lo tanto los tiempos de espera mayores.

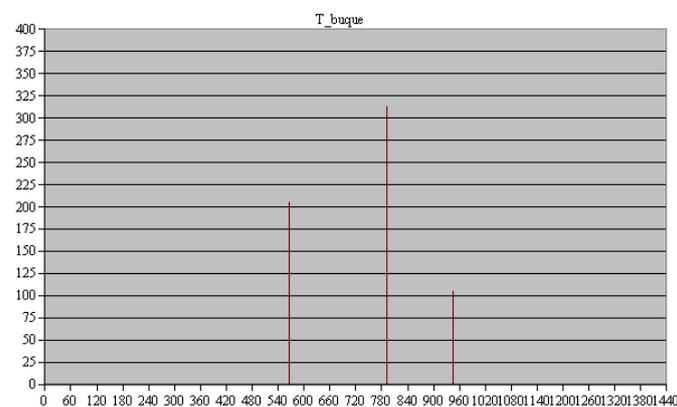


Gráfico 40 Tiempo espera buques en Distribución 5

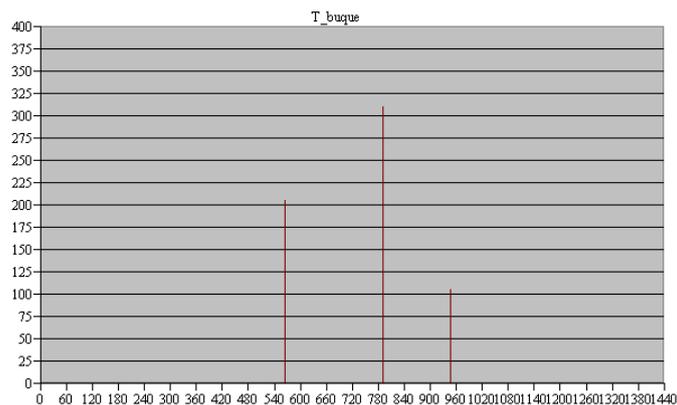


Gráfico 41 Tiempo espera buques en Distribución 6

En la tabla 14 se recogen los tiempos de espera de los cuatro buques en las distribuciones 1 a la 10. Se aprecia, como se ha comentado anteriormente que los buques 1 y 3 tienen tiempos idénticos en las 10 distribuciones. Esto se debe a que la zona de almacenaje trata de atender los buques de la forma más eficiente mandando solicitudes que colocan las grúas en las posiciones dónde son requeridas en los momentos previos. Por otro lado, en las distribuciones 4, 5, 6 y 8 tienen un tiempo de espera muy superior para el buque 2. Esto se debe a que las grúas no son capaces de atender a este buque de la manera más eficiente con el número de grúas y distribución de estas. Por último, en las distribuciones 5 y 6, el buque 4 no ha podido ser atendido al completo. De ahí que no aparezca en los gráficos y que en la tabla 14 aparezca como no completo.

	Tiempo de espera de buques (min)			
	Buque 1	Buque 2	Buque 3	Buque 4
Distribución 1	204	200	101	205
Distribución 2	204	200	101	205
Distribución 3	204	200	101	205
Distribución 4	204	300	101	206
Distribución 5	204	305	101	No Completo
Distribución 6	204	305	101	No Completo
Distribución 7	204	200	101	205
Distribución 8	204	300	101	206
Distribución 9	204	200	101	205
Distribución 10	204	200	101	205

Tabla 13 Tiempo de espera de los buques 1 al 4 en las distribuciones 1 al 10

Tiempo espera de los trenes

En los gráficos de la sección de tiempo de espera de los trenes, se muestran los tiempos de espera de los tres trenes que aparecen dentro de la simulación. Estos gráficos corresponden a los tiempos que cada uno de los tres trenes han estado en el puerto hasta que han sido procesados. Los gráficos muestran que en las distribuciones 5 y 6, sólo se consigue procesar uno de los trenes. Esto se aprecia a que en los gráficos 42 y 43 sólo aparece una línea marcando la salida del primer tren, mientras que los otros dos no aparecen durante la simulación porque no han logrado ser procesados.

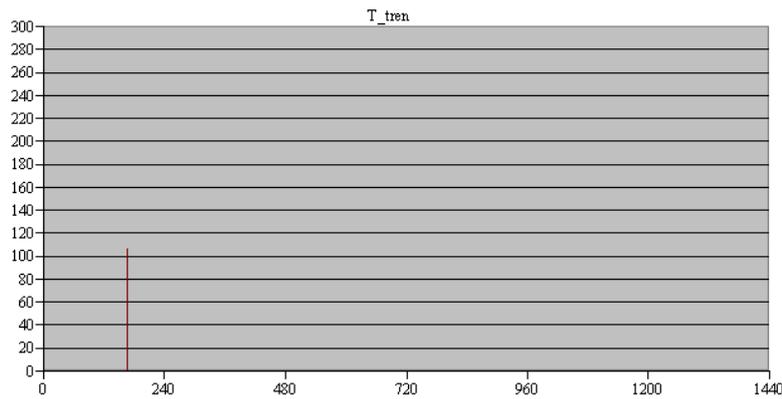


Gráfico 42 Tiempo espera trenes Distribución 5

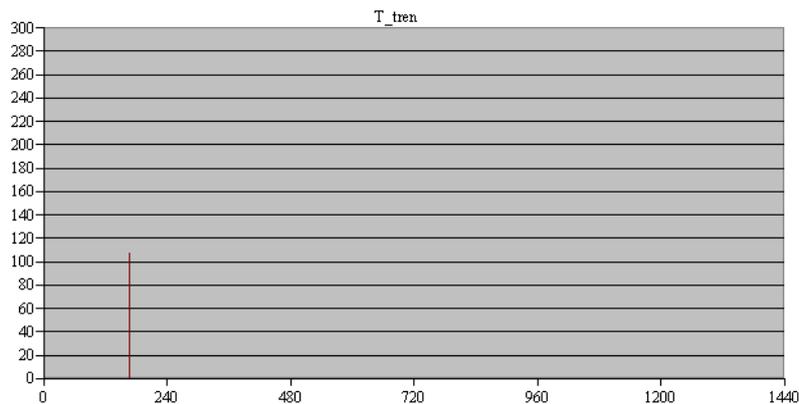


Gráfico 43 Tiempo espera trenes Distribución 6

En el resto de distribuciones, los tiempos de salida de los trenes son los mismos. Las distribuciones 1, 2, 3, 4, 7, 8, 9, y 10 han conseguido procesar todas las tareas de los tres trenes como se observa en el gráfico 44, que se usa a modo de ejemplo siendo este el tiempo de espera de los trenes de la distribución 1. Además, los tiempos de espera son muy similares. Este hecho se puede explicar porque los trenes llegan a primera y última hora del día. Momentos en el que la zona de almacenaje está menos saturada. Es por ello, que a pesar del distinto número de RTGs en cada una de las distribuciones, las RTGs son capaces de atender a todos los trenes, en estas distribuciones.

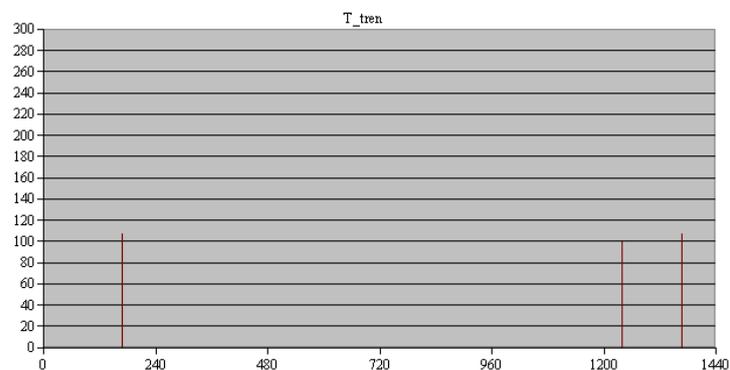


Gráfico 44 Tiempo espera trenes Distribución 1

En la tabla 14, se recogen los tiempos de espera de los trenes 1, 2 y 3 para cada una de las distribuciones. Como se puede observar, los tiempos de espera de los trenes son muy similares entre todas las distribuciones. Como se mencionó anteriormente, las distribuciones 5 y 6 no son capaces de atender las tareas de los trenes 2 y 3, y por lo tanto no salen del puerto cuando la simulación llega a su fin. De ahí, que la tabla indique como no completos los trenes 2 y 3 para las distribuciones 5 y 6.

	Tiempo de espera de trenes (min)		
	Tren 1	Tren 2	Tren 3
Distribución 1	105	100	110
Distribución 2	105	100	110
Distribución 3	105	100	110
Distribución 4	106	101	111
Distribución 5	105	No Completo	No Completo
Distribución 6	105	No Completo	No Completo
Distribución 7	105	100	110
Distribución 8	105	100	110
Distribución 9	106	101	111
Distribución 10	105	100	110

Tabla 14 Tiempo de espera de trenes para las distribuciones 1 a 10

Tiempo espera de los camiones

A continuación, los gráficos listados en este apartado muestran los tiempos de espera de cada uno de los camiones que se muestran en la simulación. Estos gráficos permiten observar el tiempo que tarda en atenderse cada uno de los camiones que entran dentro del puerto. El eje horizontal representa el tiempo transcurrido del día en minutos mientras que el eje vertical muestra el tiempo de espera de cada uno de los camiones. En estos gráficos se puede apreciar la eficiencia a la hora de atender las tareas asociadas a los camiones. Por un lado, se puede observar, que las tareas de los camiones son muy similares para las distribuciones 1, 2 y 3. El gráfico 45, que refleja los tiempos de espera de la distribución 1, es casi idéntico a los tiempos de espera de las distribuciones 2 y 3. De ahí que los tiempos medios de espera de camiones de estas distribuciones sean iguales como se recoge en la tabla 14 más adelante.

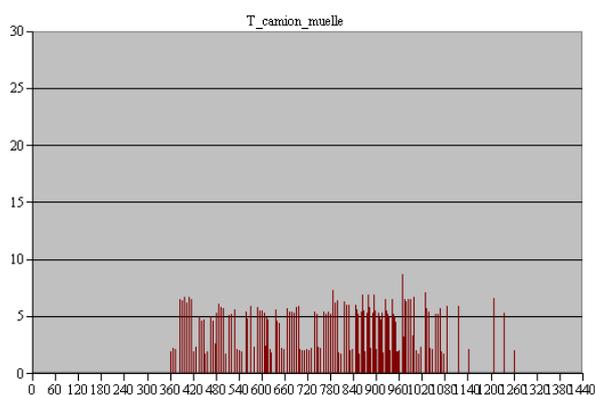


Gráfico 45 Tiempo espera camiones en Distribución 1

Por otro lado, en las distribuciones 5 y 7, representadas por los gráficos 46 y 47, se aprecian picos en los tiempos de espera de los camiones. Esto refleja que para ciertas tareas de los camiones, el tiempo de su proceso ha sido superior.

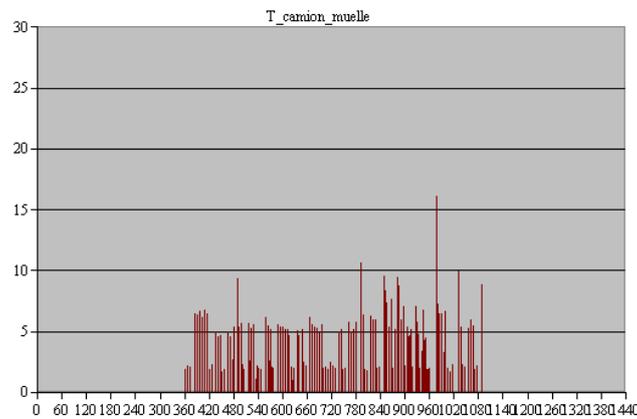


Gráfico 46 Tiempo espera camiones en Distribución 5

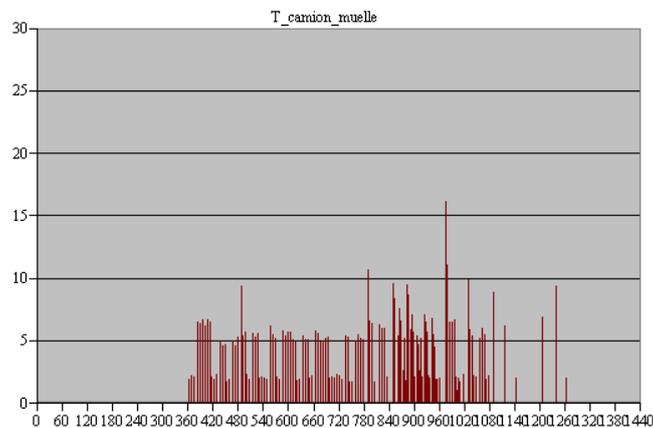


Gráfico 47 Tiempo espera camiones en Distribución 7

En las distribuciones 4, 6, 8, 9 y 10, aunque existe diferencia entre sus tiempos de espera, los tiempos de espera de los camiones son más homogéneos y no existen picos tan destacados como en las distribuciones 5 y 7. Un ejemplo es el de la distribución 4 que se muestra en el gráfico 48. Apenas se observan tiempos que sobrepasen los 6 minutos menos alguna tarea que roza los 10. Para poder analizar mejor estos gráficos, se han recogido los tiempos medios de espera de los camiones para cada una de las distribuciones en la tabla 14 que se muestra a continuación.

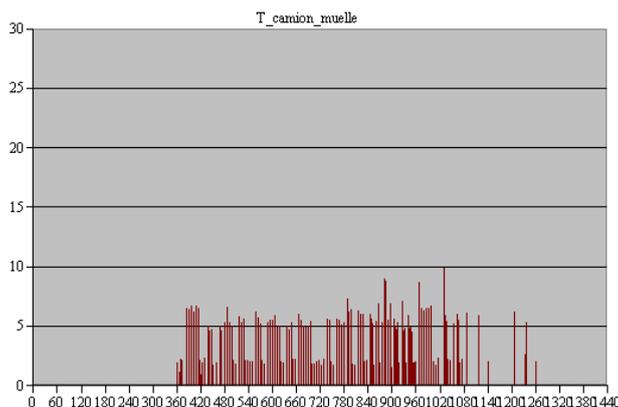


Gráfico 48 Tiempo espera camiones en Distribución 4

Finalmente, observando el gráfico 46 y 49 de las distribuciones 5 y 6, se detecta que las tareas de los camiones finalizan antes que el resto de distribuciones. Este hecho refleja que las tareas no han podido ser realizadas al completo en estas distribuciones. Esto es debido a que el número de RTGs y distribución de las grúas asociadas a estas distribuciones no son suficientes para atender a un mismo volumen de trabajo.

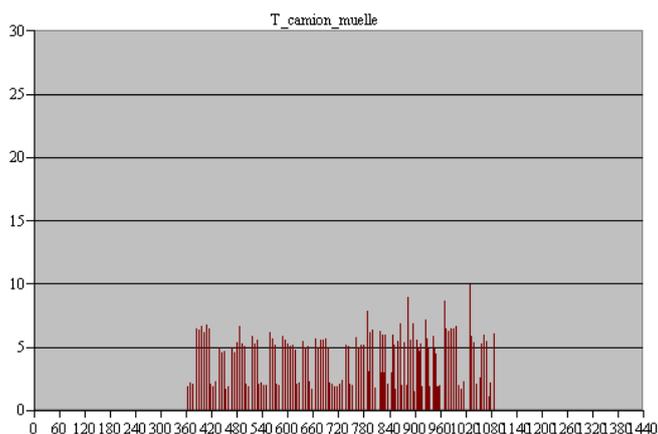


Gráfico 49 Tiempo espera camiones en Distribución 4

En la tabla 15 se muestran los tiempo medios de espera de los camiones. Se puede observar que las distribuciones 1, 2 y 3 tienen un tiempo medio igual. Por otro lado, la distribución 8 tiene el menor tiempo medio de espera de los camiones. El tiempo más alto de espera de los camiones se encuentra en la distribución 7 seguida por la 5.

	Tiempo medio espera de camiones (min)
Distribución 1	4,20
Distribución 2	4,20
Distribución 3	4,20
Distribución 4	4,26
Distribución 5	4,53
Distribución 6	4,27
Distribución 7	4,55
Distribución 8	4,19
Distribución 9	4,27
Distribución 10	4,27

Tabla 15 Tiempo medio espera de camiones en todas las distribuciones

Tiempo de tareas de descarga

Los gráficos de esta parte de la recogida de taos muestran los tiempos de descarga de contenedores para las distribuciones 1 a 10. En las distribuciones 4, 5, 6, 7 y 8, como se observa en el gráfico 50 para la distribución 4 a modo de ejemplo, se puede observar un gran aumento en los tiempos de descarga durante las horas 10 a la 12. Estos fuertes aumentos se pueden deber a las esperas que ocurren dentro del puerto. Estas esperas son debido a que las grúas solicitadas ya están ocupadas trabajando en otras tareas o desplazándose hacia ellas para poder atenderlas, generando grandes colas de tarea, y por lo tanto creando estos grandes picos de tiempo para un número de tareas.

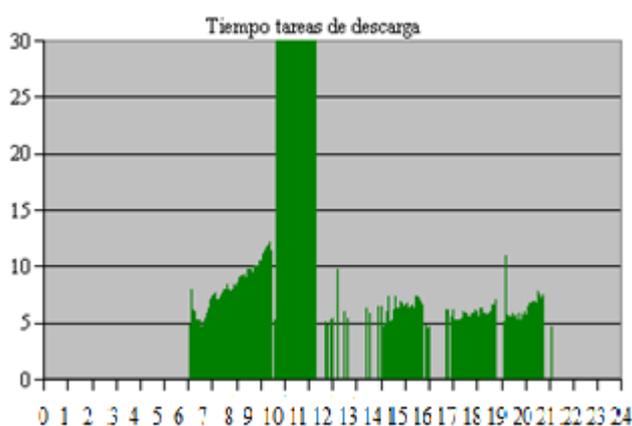


Gráfico 50 Tiempo tareas descarga en Distribución 4

Por otro lado, las distribuciones 1, 2, 3, 9 y 10, tienen unos tiempos de descarga más homogéneos. En estas distribuciones, existen picos y diferencias entre ellas pero no existe unos aumentos tan bruscos como en los casos anteriores. Eso se puede observar en el gráfico 51 para la distribución 1. Para un estudio más detallado de los tiempos de descarga, se muestra más adelante la tabla 15 que recoge los tiempos medios de espera de cada una de las distribuciones. En el gráfico 52, se puede apreciar como a diferencia de la distribución 1, en la distribución 10, los tiempos de descarga son superiores. De ahí, como recoge la tabla 15 a continuación, los tiempos medios de descarga sean superiores para la distribución 10 a pesar de no sufrir una fuerte subida como en el caso de la distribución 4, 5, 6, 7 y 8.

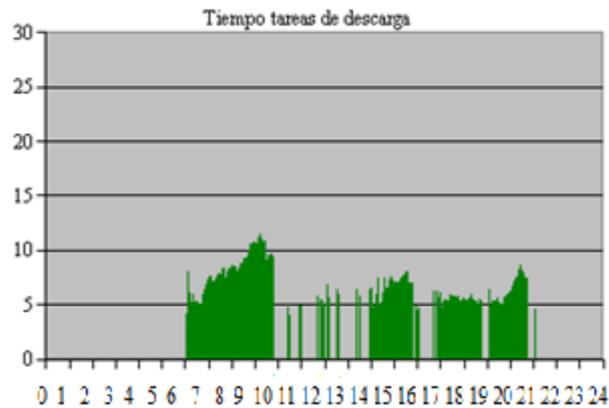


Gráfico 51 Tiempo tareas descarga en Distribución 1

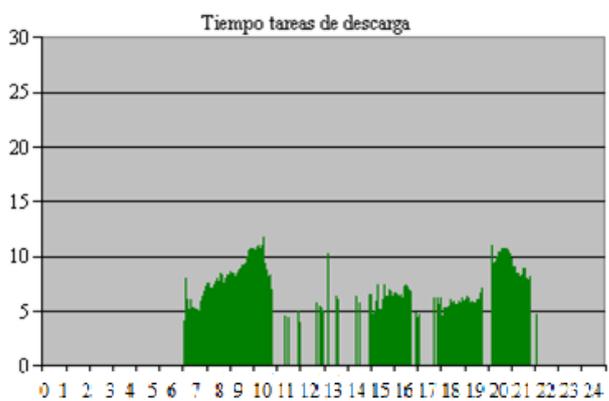


Gráfico 52 Tiempo tareas descarga en Distribución 10

Tiempo de tareas de carga

A continuación, se muestran las tareas de carga de contenedores en cada una de las distribuciones. Aunque en algunos casos como en la distribución 1 o 2 existen unas subidas en el tiempo de espera para algunas tareas de carga, en general, las tareas de carga no sufren grandes subidas como pasa con las tareas de descarga. Se puede observar en el gráfico 53 y 54.

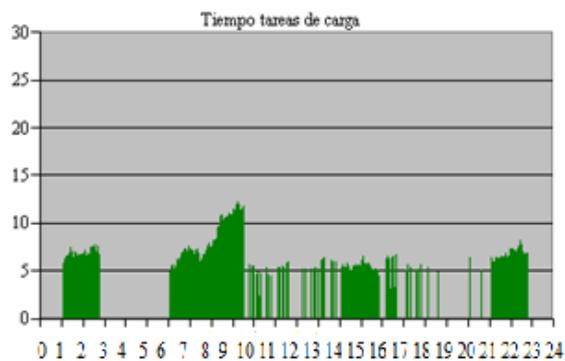


Gráfico 53 Tiempo tareas carga en Distribución 1

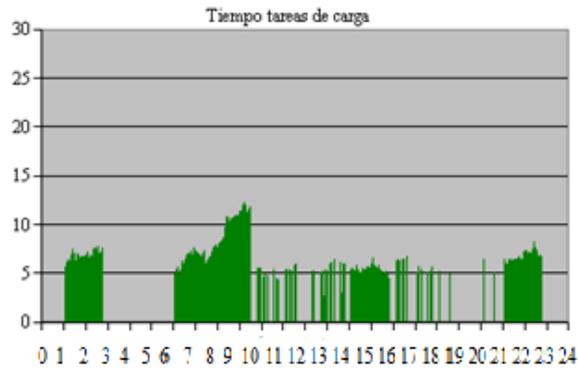


Gráfico 54 Tiempo tareas carga en Distribución 2

En los gráficos 55 y 56, se puede apreciar que en las distribuciones 5 y 6, no se consiguen realizar todas las tareas de carga. Esto se refleja por el hecho de que llega un momento en que no aparecen más líneas de tiempo de carga.

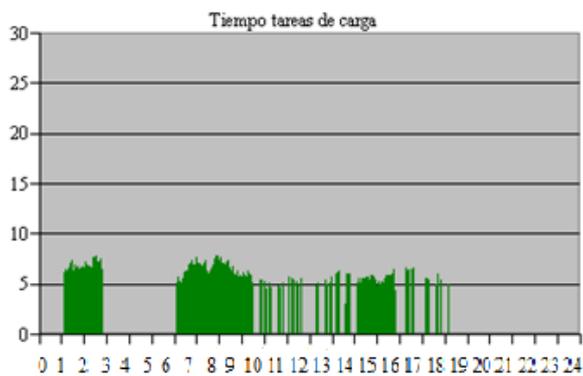


Gráfico 55 Tiempo tareas carga en Distribución 5

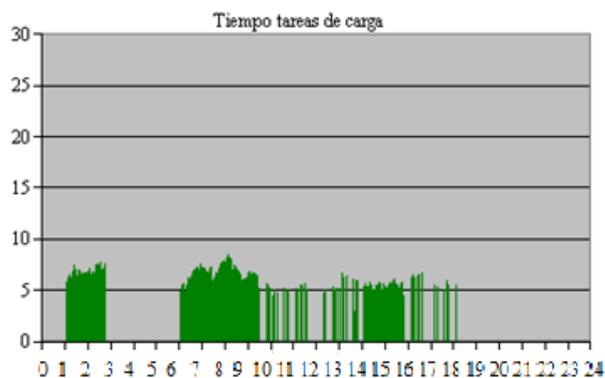


Gráfico 56 Tiempo tareas carga en Distribución 6

Esto se debe a que el puerto no es capaz de atender a estas tareas debido a la escasez de grúas con las que cuentan estas dos distribuciones. Comparando con el resto de distribuciones, se puede apreciar como en estas distribuciones, 1, 2, 3, 4, 7, 8, 9 y 10 respectivamente, si son capaces de atender a todas las tareas de carga del puerto. Cabe destacar que en los gráficos 57 y 58, distribuciones 9 y 10, existe un pico importante en los tiempos medios de las tareas de carga entre las horas 6 y 10. Esto se debe a que las grúas, al ser menos, tardan más tiempo en procesar todas las tareas que entran dentro del puerto, aumentando así los tiempos de espera de los

camiones. A continuación se muestra en la tabla 15, todos los tiempos medios de carga para todas las distribuciones para analizar mejor cada una de las distribuciones.

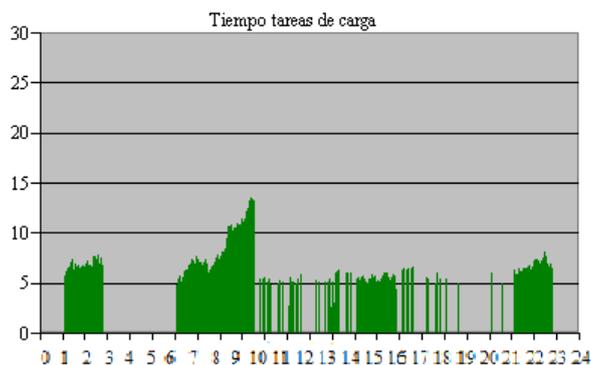


Gráfico 57 Tiempo tareas carga en Distribución 9

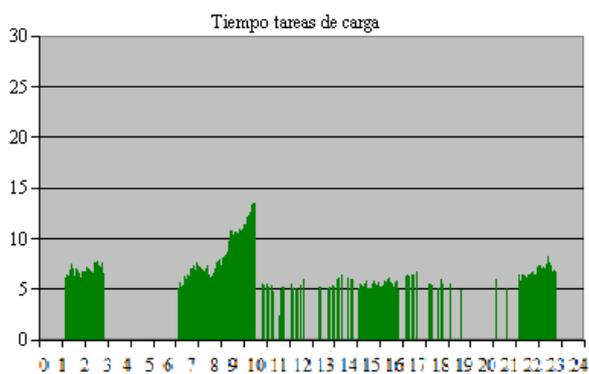


Gráfico 58 Tiempo tareas carga en Distribución 10

En la tabla 16 se muestran los tiempos medios de carga y descarga en cada una de las distribuciones. Además, se indica si todas las tareas se han completado (Completo) o no se han realizado todas (No Completo) en la columna de estado de las tareas. En los tiempos medios de descarga se puede observar una diferencia muy grande en las distribuciones 4 a la 8. Esto se debe al aumento tan importante que se observa en las gráficas de tiempos de descarga. Este importante aumento en los tiempos medios de descarga se puede explicar al hecho de que la zona de almacenaje se ve colapsada al tener un número bajo de RTGs en las hileras 1 y 3. Esto hace que las RTGs tengan colas muy altas y las tareas tarden mucho en realizarse una vez asignadas a una RTG, aunque esta sea la mejor de entre las posibles candidatas. El mejor tiempo de descarga se observa en las distribuciones 1, 2 y 3, seguido por la distribución 9. Estas distribuciones coinciden con un alto número de RTGs, igual o mayor que 4, en las hileras 1 y 3. Son capaces de responder rápidamente a todas las tareas que exige el puerto. Por otro lado, los tiempos medios de carga son más homogéneos entre las distintas distribuciones. El tiempo más bajo de carga se encuentra en la distribución 7, seguido muy de cerca por las distribuciones 4 y 8. Estas tres distribuciones tienen en común que tienen 3 RTGs en las hileras 1 y 3. Al contrario, a pesar de tener un mayor número de RTGs en las hileras 1 y 3, las distribuciones 9 y 10 tienen tiempos medios de carga mayores. Esto puede explicarse en que al tener más grúas, y por lo tanto más libres, a la hora de seleccionarlas, estas se ven obligadas a desplazarse distancias mayores. Además, se debe analizar si había grúas ociosas, que no aportan a la hora de reducir

tiempos, en cada una de las distribuciones, para ver cómo funcionan realmente las grúas en cada uno de los casos.

	Tiempo medio descarga (min)	Tiempo medio carga (min)	Estado tareas
Distribución 1	6,35	6,52	Completo
Distribución 2	6,35	6,52	Completo
Distribución 3	6,35	6,52	Completo
Distribución 4	21,59	6,26	Completo
Distribución 5	25,08	6,49	No Completo
Distribución 6	26,11	6,53	No Completo
Distribución 7	20,83	6,22	Completo
Distribución 8	21,29	6,26	Completo
Distribución 9	6,39	6,55	Completo
Distribución 10	6,64	6,55	Completo

Tabla 16 Tiempos medios de descarga y carga para todas las distribuciones

Control de funcionamiento de las RTG

Los gráficos que se incluyen en esta parte a continuación muestran las tareas atendidas por hora por cada RTG y los desplazamientos realizados por hora por cada RTG en la distribución 2. Debido al gran número de gráficos que hay por distribución, se utilizan los de la distribución 2 como ejemplo.

Estos gráficos permiten controlar el nivel de utilización de cada una de las grúas disponibles. Por ejemplo en la distribución 2, las grúas 6, 12 y 18 no aparecen porque se han retirado y no están disponibles para realizar ninguna actividad de carga y descarga durante la simulación. Por otro lado, se puede observar que las grúas 3, 9 y 15 no realizan ninguna tarea. Esto se observa por ejemplo mediante los gráficos 59 y 60 que no registran ninguna actividad de las RTGs 3, durante la simulación. Esto significa que esta grúa no ha realizado ninguna tarea y no ha sido ni siquiera solicitada por ninguna tarea para trabajar en labores de carga y descarga. En la tabla 16, este tipo de grúa se clasifica como ociosas.

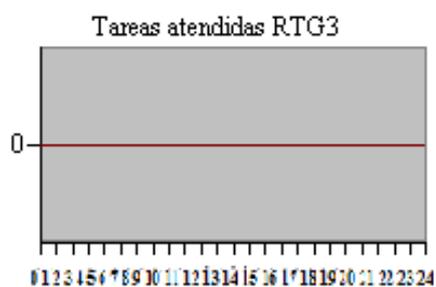


Gráfico 59 Tareas realizadas en cada hora por la RTG3 en Distribución 2

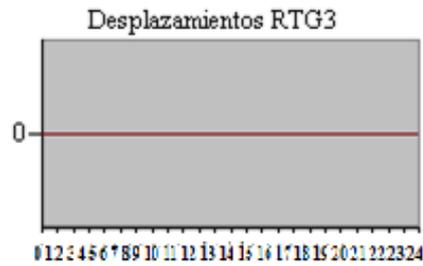


Gráfico 60 Desplazamientos realizados por hora por la RTG3 en la Distribución 2

Además, se puede medir el nivel de trabajo de cada una de ellas. Por ejemplo las grúas 1, 2 13, 14 y 17 tienen un alto nivel de utilización. Este hecho se puede apreciar en los gráficos 61 y 62 para la RTG1. Este conjunto de grúas realizan más de 20 tareas en las horas que están trabajando y se desplazan hasta un máximo de tres veces cada hora. Es por ello que su nivel de utilización se considera alto y por lo tanto son clave a la hora de atender las tareas dentro del puerto.

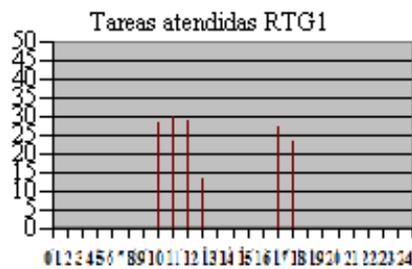


Gráfico 61 Tareas realizadas en cada hora por la RTG1 en Distribución 2

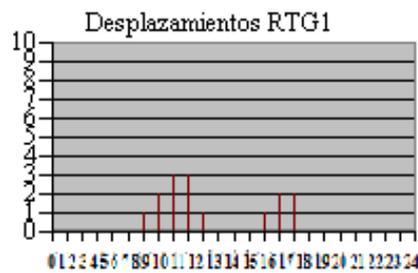


Gráfico 62 Desplazamientos realizados por hora por la RTG1 en la Distribución 2

En un punto intermedio se encuentran las RTGs 7, 8, 10 y 11. Como muestran los gráficos 63 y 64, la grúa RTG7 está menos cargada. Como es el caso de la RTG7, estas grúas realizan alrededor de 10 tareas por hora cuando son solicitadas y se desplazan una o dos veces por hora. A pesar de que son requeridas para realizar tareas, estas no tienen una carga de trabajo tan elevada. A continuación, en la tabla 16 se muestra el nivel de ocupación de todas las RTGs para las diez distribuciones.

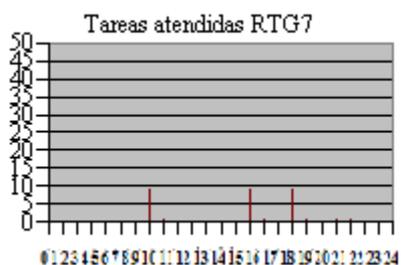


Gráfico 63 Tareas realizadas en cada hora por la RTG7 en Distribución 2

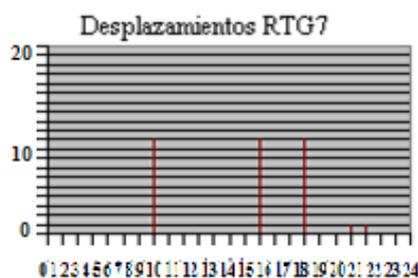


Gráfico 64 Desplazamientos realizados por hora por la RTG7 en la Distribución 2

La tabla 17 recoge para las distribuciones 1 a 10, las grúas que no realizan ninguna tarea (Ociosas), las que están más cargadas de trabajo (Cargadas) y las grúas que no están disponibles en esa distribución (No disponible). De esta manera se puede observar si la distribución está siendo eficiente o existen RTGs que no se están utilizando o su nivel de trabajo es muy bajo. En las distribuciones 1, 2 y 10 existen RTGs ociosas durante la simulación. Por lo tanto, no son distribuciones eficientes.

Por otro lado, se puede observar que en el general las RTGs más cargadas se suele repetir en las diferentes distribuciones. Esto refleja que las RTGs 1, 5, 13 y 17 en general son las más solicitadas en cada una de las distribuciones.

Controlando el nivel de trabajo de las grúas RTG en las distintas distribuciones aparte de saber que grúas trabajan o no, o su nivel de trabajo, ha sido útil para que a la hora de pasar de una distribución a otra en este estudio, saber que grúas ir retirando. De esta manera, se ha podido llegar a una distribución eficiente.

	Ociosas	Cargadas	No disponibles
Distribución 1	3, 4, 9, 12, 15, 16	1, 2, 5, 6, 13, 14, 17, 18	0
Distribución 2	3, 9, 15	1, 2, 4, 5, 13, 14, 16, 17	6, 12, 18
Distribución 3	0	1,2,4,5,14,16,17	3,6,9,12,15,18
Distribución 4	0	1,2,5,13,14,17	3,4,6,9,10,12,15,16,18
Distribución 5	0	1,5,13,17	2,3,4,6,8,9,10,12,14,15,16,18
Distribución 6	0	1,5,13,17	2,3,4,6,9,10,12,14,15,16,18
Distribución 7	0	1,2,5,13,17	3,4,6,9,10,12,15,16,18
Distribución 8	0	1,2,5,13,14,17	3,4,6,9,12,15,16,18
Distribución 9	0	1,2,5,13,14,16,17	3,6,9,10,12,15,18
Distribución 10	3,15	1,2,5,13,14,16,17	6,9,10,12,18

Tabla 17 Nivel de ocupación de las RTGs en todas las distribuciones

7.2.2. Conclusiones:

Observando los resultados obtenidos se puede entender lo sucedido en cada uno de los ensayos para determinar que distribución es la más eficiente en este puerto.

En primer lugar, al ver los tiempos de espera de los buques se observa que las distribuciones 5 y 6 no consiguen procesar todas las tareas de estos dejando al cuarto buque todavía en el puerto cuando acaba el tiempo de simulación. Esto ocurre también con los trenes en estas dos distribuciones. Además en las distribuciones 4 y 8, los tiempos de salida son superiores a los del resto. Estos resultados, llevan a la conclusión de que las distribuciones 5 y 6 no son adecuadas ya que no consiguen procesar toda la carga de trabajo.

Continuando con los resultados de los tiempos medios de espera de los camiones, se determina que la distribución 8 permite la salida de camiones con el menor tiempo de espera. Las distribuciones 1, 2, y 3 la siguen muy de cerca. También son bajos los tiempos de espera de las distribuciones 4, 6, 7, 9 y 10. El tiempo más alto de espera se obtiene en las distribuciones 7 y 5.

Por otro lado, los tiempos medios de carga y descarga permiten descartar algunas de las distribuciones. Las distribuciones 5 y 6 ya descartadas muestran unos tiempos de descarga muy altos. Esto ocurre también con las distribuciones 4, 7 y 8. Estos datos tan altos en los tiempos de descarga se deben a un importante pico en los tiempos de descarga para una serie de tareas. La explicación a este aumento, se debe a que con estas distribuciones las grúas se ven colapsadas y tiene una cola muy grande. Esto conlleva a que las tareas pasen mucho tiempo en cola. Además, los tiempos medios de descarga más bajos son los de las distribuciones 1, 2 y 3, seguida muy de cerca por la distribución 9. Esta misma distribución tiene un tiempo medio de carga bajo dentro de las distribuciones no descartadas. Por lo tanto, después de analizar los tiempos medios de carga y descarga, quedan como posibles distribuciones la 1, 2, 3, 9 y 10.

Finalmente, se estudian los resultados del control de trabajo de las grúas RTG mediante el número de tareas realizadas por hora y el número de desplazamientos por hora. Se puede observar que las distribuciones 1, 2 y 10 tienen grúas ociosas durante la simulación. En cambio, las distribuciones 3 y 9 no tienen ninguna grúa ociosa. Comparando los tiempos medios de camiones, de descarga y carga, la distribución 3 es superior a la 9 en cada una de ellas.

Se concluye que es la distribución 3 la mejor distribución de grúas RTG dentro del puerto. Primero, es capaz de atender todas las tareas procedentes de buques, trenes y camiones, frente a otras distribuciones que no son capaces de atender el mismo volumen de trabajo en el mismo tiempo de simulación. Tiene el menor tiempo de descarga, 6,35 minutos. Siendo este muy inferior a los tiempos de las distribuciones que superan los veinte minutos de tiempo medio. Además, las únicas distribuciones que la igualan cuentan con grúas ociosas. Por otro lado, tiene el tiempo de carga más bajo de entre las distribuciones que no colapsan por la carga de trabajo. También, tiene el tiempo medio de espera de camiones más pequeño, reduciendo hasta en un 7,82% el tiempo respecto al tiempo más alto. Finalmente, esta distribución no tiene ninguna grúa ociosa, lo que da a entender que este número y distribución en hileras de las grúas es eficiente para atender un mismo volumen de trabajo.

8. Conclusión

La primera parte de este trabajo consta de un análisis sobre la relevancia de las terminales portuarias de mercancías. Para ello, se ha tenido en cuenta los diferentes medios de transporte que intervienen en el transporte de mercancías a nivel mundial, transporte por carretera, por ferrocarril, marítimo y aéreo. Se ha comentado la importancia de cada uno de ellos y su papel dentro de la cadena de transporte intermodal.

En esta primera parte además, para analizar la importancia del transporte marítimo y de las terminales portuarias, se han comparado los costes y efectos medioambientales del transporte de mercancías por mar con el resto de medios de transporte. Concluyendo que el transporte de mercancías por mar y por contenedor transportado, es el más económico y respetuoso con el medio ambiente. Siendo este, por lo tanto, una pieza clave en el comercio a nivel mundial.

De igual forma, se ha realizado un análisis de la evolución del transporte marítimo, comentando la principal maquinaria y elementos principales dentro de un puerto de contenedores. Además, se ha hecho una clasificación de los diferentes subsistemas dentro del puerto para comprender el funcionamiento de una terminal. Finalmente, se ha incluido la planificación que sigue una terminal de contenedores portuaria para llevar a cabo las funciones que se realizan dentro de ella.

Después de analizar todos estos hechos, este documento trata de analizar el trabajo de las grúas de explanada dentro de una terminal portuaria de contenedores. Para ello, se ha creado una simulación de un puerto mediante la herramienta de simulación ARENA. La versatilidad de este programa ha permitido incluir los distintos procedimientos, limitaciones y restricciones de un puerto con el objetivo de simular la terminal de la manera más realista posible.

Este trabajo se ha centrado en estudiar el funcionamiento de las operaciones de carga y descarga de la zona de almacenaje del puerto para analizar el trabajo de las grúas de explanada. Para ello, se han incluido las restricciones de interferencia, cantidad de grúas dentro de un bloque y desplazamientos entre hileras. Además, se ha incluido las tareas de elementos externos a la zona de almacenaje como son las cabezas tractoras y grúas pórtico.

En la segunda parte del trabajo, se muestran y analizan los resultados de dos estudios realizados utilizando la herramienta de simulación. En primer lugar, se ha analizado cuatro posibles distribuciones de la zona de almacenaje a la hora de realizar la carga y la descarga para analizar la eficiencia del trabajo de las grúas RTG. Siendo estas distribuciones, descarga en la hilera 1 y carga en la hilera 3, descarga en la hilera 3 y carga en la hilera 1, descarga en parte izquierda y carga en parte derecha, y descarga en parte derecha y carga en parte izquierda. Siendo estas distribuciones 1, 2 3 y 4 respectivamente. Se ha determinado que la distribución 2 es la más eficiente al tener un tiempo de espera de camiones de hasta un 29,70% inferior al máximo, tener los tiempos de descarga y carga más pequeños, siendo estos un 9,25% y un 8,20% menores que los mayores tiempos. Y además, concluir que requiere menos grúas para atender al mismo volumen de carga, siendo por lo tanto más eficiente esta distribución.

Finalmente, el segundo estudio consiste en el análisis de las distintas distribuciones de las RTGs que funcionan en los bloques de la zona de almacenaje. Para ello, se han variado el número de las RTGs y las distintas colocaciones de estas en 10 distribuciones distintas, con el mismo

volumen de trabajo, con el objetivo de determinar que distribución es mejor. Se ha concluido que la distribución con cuatro RTGs en cada hilera es la distribución más eficiente. Con esta distribución el puerto es capaz de atender a todos los buques, trenes y camiones, al contrario de otras distribuciones que no son capaces de atender al mismo volumen de trabajo en el mismo tiempo. Su tiempo medio de espera de camiones es el menor, contando con una reducción de hasta un 7,82% con respecto al tiempo más alto. Además, tiene el tiempo medio de descarga más bajo. Siendo este de 6,35 minutos frente a otras distribuciones que superan los veinte minutos. También, de entre las distribuciones que son capaces de atender todas las tareas sin colapsar por la carga de trabajo, tiene el menor tiempo de carga. Para concluir, esta distribución no tiene ninguna grúa ociosa durante la simulación lo que refleja que este número y distribución en hileras de grúas es eficiente a la hora de realizar las tareas de carga y descarga dentro de la zona de almacenamiento.

Bibliografía

(s.f.). www.konecranes.com.

A.Oliveira, J. (2013). *Buques Portacontenedores. El Triple-E Maersk Mc-Kinney Moller*.

Alejandro Escudero, J. M. (2012). Oportunidades del daily drayage problem en la optimización del transporte de mercancías europeo. *6th International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management*.

Arango, C. (2014). *Optimización basada en simulación para la gestión de operaciones de las terminales de contenedores portuarias*. Tesis Doctoral, Universidad de Sevilla, Dpto. Organización Industrial y Gestión de Empresas, Sevilla.

Cadena de suministro. (2010). *Los puertos preparan sus instalaciones para la llegada de los buques más grandes del mundo*.

Carrasquilla, E. H. (2008/2009). *Transporte Intermodal de Mercancías. Análisis y Modelos*. Sevilla: Universidad de Sevilla. Departamento de Organización Industrial y Gestión de Empresas.

Chuqian Zhang, Y.-w. W. (2001). Dynamic crane deployment in container storage yards. *PERGAMON. Transportation Research Part B*, 537-555.

Costa, C. R. (2006). *Los puertos en el transporte marítimo*. Cataluña: EOLI: Enginyeria d'Organització i Logística Industrial.

Der-Horng Lee, Z. C. (2006). Scheduling of two-transtainer systems for loading outbound containers in port terminals with simulated annealing algorithm. *International journal of production economics*, 115-124.

Eguía Salinas, I., & Racero Moreno, J. (2013). *Introducción a la Simulación*. (D. d. I, Ed.) Sevilla: Universidad de Sevilla.

Ferropedia. (1 de Mayo de 2014). Tren de mercancías. *Ferropedia*.

Gobierno de España. Ministerio de Fomento. Secretaría de Estado de Transportes. (2011). *Observatorio del transporte intermodal terrestre y marítimo*. España: Spim.

Institute for Transport Studies. (2010). *El Futuro de un transporte de mercancías y una logística sostenibles*. Parlamento Europeo. Director General de Políticas Interiores.

Junta de Comercio y Desarrollo. (2013). *Acontecimientos y tendencias recientes en el transporte. Nota de la secretaría de la UNCTAD*. Ginebra: Naciones Unidas.

Kim, S. H. (2006). Load scheduling for multiple quay cranes in port container terminals. *J Intell Manuf Springer Science+Business Media*, 479-492.

Konecranes. (2014). *Konecranes Lifting Business*.

Lanzarote, C. (2013). *Servicio aéreo urgente*. Lanzorte: Cargo Lanzarote.

- Matthew E.H. Peteringa, K. G. (2008). Effect of block length and yard crane deployment systems on overall performance at seaport container transshipment terminal. *ELSEVIER. Computers & Operations Reserach*, 1711-1726.
- Ng, W. (2003). Crane scheduling in container yards with inter-crane interference. *European Journal of Operational Research*, 64-78.
- Ng, W. C. (2005). An effective heuristic for scheduling a yard crane to handle jobs with different ready times. *Engineering Optimization*, 867-877. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.1080/03052150500323849>
- Oliveira, J. A. (2013). *BUQUES PORTACONTENEDORES. EL TRIPLE-E MAERSK MC-KINNEY MOLLER*. Un blog semanal de divulgación naval. Buques de carga.
- Puerto Bahía de Algeciras. (Noviembre, 2013). *The Port of Algeciras Bay receives its first Triple-E*. Algeciras.
- Puerto de Sevilla. (2014). *Terminales Portuarias*. Sevilla.
- Secretaría de la UNCTAD. (2012). *UNCTAD (Conferencia de las naciones unidas sobre comercio y desarrollo) EL transporte marítimo 2012*. New York y Ginebra: Naciones Unidas.
- Terberg Benschop. (2014). *Trailor-made tractors*.
- UNCTADstat. (2013). *UNCTADstat*.
- W.C. Ng, K. M. (2004). Yard crane scheduling in port container terminals. *ELSEVIER. Applied Mathematical Modelling*, 263-276.
- World Shipping Council. (2013). *TOP 50 WORLD CONTAINER PORTS*. <http://www.worldshipping.org/about-the-industry/global-trade/top-50-world-container-ports>.
- Zyngiridis, I. (2005). *Optimizing container movements using one and two automated stacking cranes*. Monterey, California: Naval Postgraduate School.