

Trabajo de Fin de Máster

Estudio sobre el avance del conocimiento en la automatización de las terminales portuarias de contenedores



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Máster Universitario en Transporte, Territorio y Urbanismo

Curso 2018/19

Septiembre 2019

Alumno: Miguel Baviera García.

Tutor: Dr. José Aguilar Herrando.



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE CAMINOS,
CANALES Y PUERTOS



Agradecimientos

Antes de comenzar el presente trabajo, quiero mostrar mi agradecimiento hacia el Prof. Dr. José Aguilar, por darme la oportunidad de realizar el mismo, por sus consejos y su guía, pero sobretodo por el excelente trato dispensado.



Resumen

Dada la alta competitividad del sector portuario, así como la alta especialización de los tráficos, se intenta dar un valor añadido a los clientes, y en especial a las navieras, que buscan tiempos de estancia bajos para poder maximizar la rentabilidad del buque.

Por otro lado, y centrándose en el tráfico de contenedores marítimos, los operadores de las terminales buscan una eficiencia en las operaciones, y en algunos casos, además, un aumento de la capacidad. Actualmente existe una tendencia de llevar a cabo la consecución de los objetivos anteriores a partir de la automatización de la terminal.

Esta tendencia de automatización ha crecido muy rápidamente desde la apertura en 1993 de la primera terminal de este tipo. Es por ello, que, este trabajo tiene como objetivo estudiar la evolución de estas, enfocándose en los avances más recientes, teniendo varias perspectivas.

En primer lugar, se examina el avance en los distintos elementos que componen la terminal de contenedores automatizada, para posteriormente ver qué problemas se han resuelto en el ámbito académico. Finalmente se realizará un análisis de las terminales automatizadas y semiautomatizadas existentes.



Abstract

The high competitiveness of port industry coupled with the specialization of maritime have resulted in rising the added value they place toward customers. The ones most affected are usually the shipping companies which seek short turnarounds to maximize the ship's cost-efficiency.

Furthermore, -and focusing in the traffic of containers- terminal operator's aim is to ensure operations are efficient, and in some cases, to increase capacity. Current trends try to accomplish both goals with the automation of port container terminals.

That trend of automation has rapidly expanded since its inception in 1993. This project will therefore study the evolution of said innovations, centring itself in the progress achieved recently.

Firstly, this paper will discuss the evolution of the various elements that compose an automated terminal. Secondly, all problems present within said elements and already solved by the academia will be examined. Finally, an analysis of all existing automated and semi-automates terminals will be done.



Resum

Donada l'alta competitivitat del sector portuari, així com l'alta especialització dels trànsits, s'intenta donar un valor afegit als clients, i especialment a les navilieres, que busquen temps d'estada baixos per a poder maximitzar la rendibilitat del vaixell.

D'altra banda, i centrant-se en el trànsit de contenidors marítics, els operadors de les terminals busquen una eficiència en les operacions, i en alguns casos, a més, un augment de la capacitat. Actualment existeix una tendència de dur a terme la consecució dels objectius anteriors a partir de l'automatització de la terminal.

Aquesta tendència d'automatització ha crescut molt ràpidament des de l'obertura en 1993 de la primera terminal d'aquest tipus. És per això, que, aquest treball té com a objectiu estudiar l'evolució d'aquestes, enfocant-se en els avanços més recents, tenint diverses perspectives.

En primer lloc, s'examina l'avanç en els diferents elements que componen la terminal de contenidors automatitzada, per a posteriorment veure quins problemes s'han resolt en l'àmbit acadèmic. Finalment es realitzarà una anàlisi de les terminals automatitzades i semiautomatitzades existents.



Índice

Capítulo 1. Introducción.	11
1.1 La terminal portuaria de contenedores.....	14
1.2 Concepto de automatización en TPCs.....	15
Capítulo 2. Problemática.	17
Capítulo 3. Metodología y organización del trabajo.....	18
Capítulo 4. Automatización de los elementos y subsistemas que componen una terminal portuaria de contenedores.....	21
4.1 Subsistema de carga y descarga de buques.	21
4.2 Subsistema de almacenamiento.....	27
4.2.1 ARMG/ASC.	28
4.2.2 ARTG	32
4.2.3 OHBC.....	35
4.3 Subsistema de interconexión.....	36
4.3.1 AGVs.....	37
4.3.2 Lift-AGV.....	40
4.3.3 Cassette-AGV	41
4.3.4 ALV	42
4.3.5 IAV	43
4.4 Subsistema de recepción y entrega.....	46
4.6 Infoestructura y TICs.....	50
Capítulo 5. Estado del arte en el ámbito académico de la automatización de los diferentes subsistemas y elementos de una TPC.	54
5.1 Estudios realizados en el subsistema de carga y descarga.....	54
5.2 Estudios realizados sobre ARMGs	54
5.2.1 Políticas de apilado (stacking) y asignación (assignment)	54
5.2.2 Scheduling	56
5.3 Estudios realizados sobre ARTGs	59
5.3.1 Políticas de apilado (stacking) y asignación (assignment)	59
5.3.2 Scheduling	59
5.4 Estudios realizados sobre OHBC	59
5.4.1 Políticas de apilado (stacking) y asignación (assignment)	59
5.4.2 Scheduling	60
5.5 Estudios realizados sobre AGVs	60
5.5.1 Toma de decisiones y asignación	60



5.5.2 Scheduling	61
5.6 Estudios realizados sobre ALVs	62
5.6.1 Scheduling de ALVs como vehículo de interconexión.....	62
5.6.2 Comparación con otra tipología de vehículos	63
5.6.3 Scheduling de ALVs en almacenamiento e interconexión.....	63
5.7 Estudios realizados sobre L-AGV	64
5.7.1 Scheduling	65
5.7.2 Comparación entre vehículos.....	65
5.8 Estudios realizados sobre C-AGV	65
5.9 Estudios realizados sobre IAV	65
5.10 Problemas de estudio conjunto de varios subsistemas	66
5.10.1 Optimización de interconexión y grúas de muelle	66
5.10.2 Optimización de interconexión, grúas de muelle y almacenamiento	67
5.10.2.1 Optimización basada en asignación de tareas	68
5.10.3 Optimización de interconexión y almacenamiento	69
Capítulo 6. Estado del conocimiento de automatización de TPC automatizadas en su implantación real.	70
6.1 Análisis de las terminales automatizadas y semiautomatizadas existentes	70
6.1.1 Análisis de las terminales automatizadas.....	71
6.1.1.1 Terminales con almacenamiento basado en ASCs	72
6.1.1.1.1 ECT Delta.....	72
6.1.1.1.2 HHLA Container Terminal Altenwerder	73
6.1.1.1.3 ECT Euromax.....	75
6.1.1.1.4 Victoria International Container Terminal	76
6.1.1.1.5 Rotterdam World Gateway (RWG).....	77
6.1.1.1.6 APM Terminals Maasvlakte II.....	78
6.1.1.1.7 Long Beach Container Terminal.....	79
6.1.1.1.8 TraPac Los Angeles Container Terminal	80
6.1.1.1.9 Qingdao New Qianwan Container Terminal	81
6.1.1.1.10 Shanghai Yangshan Deep Water Port	82
6.1.1.2 Terminales con almacenamiento basado en ARTGs.....	84
6.1.1.2.1 Tobishima Container Berth.....	84
6.1.1.3 Terminales con almacenamiento basado en ALVs.....	85
6.1.1.3.1 Brisbane AutoStrad Terminal	85



6.1.1.3.2 Sydney AutoStrad Terminal	86
6.1.1.4 Estadísticas de las terminales automatizadas	87
6.1.1.4.1 Estadísticas de las terminales automatizadas con almacenamiento basado en ASCs.....	87
6.1.1.4.2 Estadísticas de las terminales automatizadas con almacenamiento basado en ARTGs	89
6.1.1.4.3 Estadísticas de las terminales automatizadas con almacenamiento basado en ALVs.....	89
6.1.1.4.4 Estadísticas de las terminales automatizadas con interconexión basada en AGVs.....	90
6.1.1.4.5 Estadísticas de las terminales automatizadas con interconexión basada en L-AGV	90
6.1.1.4.6 Estadísticas de las terminales automatizadas con interconexión basada en ALVs	91
6.1.1.4.7 Estadísticas de las terminales automatizadas a nivel geográfico	91
6.1.1.4.8 Discusión.....	91
6.1.2 Análisis de las terminales semiautomatizadas	93
6.1.2.1 Terminales con almacenamiento basado en OHBC	96
6.1.2.1.1 Pasir Panjang Terminal 1	96
6.1.2.2 Terminales semiautomatizadas con almacenamiento basado en ARTGs.....	98
6.1.2.2.1 Terminal Petikemas Semarang	98
6.1.2.3 Terminales semiautomatizadas con almacenamiento basado en ARMGs	99
6.1.2.3.1 Oi Container Terminal Berth 5.....	99
6.1.2.3.2 Evergreen Kaohsiung Container Terminal (K79-K81)	101
6.1.2.3.3 Virginia International Gateway	102
6.1.2.3.4 Taipei Port Container Terminal	104
6.1.2.3.5 Hyundai Pusan New Port Terminal	105
6.1.2.3.6 Pusan Newport Company	106
6.1.2.3.7 Hanjin Busan Newport	107
6.1.2.3.8 Pusan Newport International Terminal	107
6.1.2.3.9 TTI Algeciras	108
6.1.2.3.10 Kao Ming Container Terminal.....	110
6.1.2.3.11 Busan New Container Terminal	111
6.1.2.3.12 Khalifa Port Container Terminal	112



6.1.2.3.13 Barcelona Europe South Terminal (BEST).....	113
6.1.2.3.14 Jebel Ali Terminal 3.....	114
6.1.2.3.15 Teruk Lamong Terminal	115
6.1.2.3.16 Sydney International Container Terminals	116
6.1.2.3.17 Brisbane Container Terminals.....	117
6.1.2.3.18 DP World Australia's Brisbane Terminal	118
6.1.2.3.19 London Gateway	119
6.1.2.3.20 Pasir Panjang Terminals 4-6.....	120
6.1.2.3.21 Sunkwang Newport Container Terminal.....	121
6.1.2.3.22 Keelung West Coast Container Terminal: North Container Yard	122
6.1.2.3.23 Hanjin Incheon Container Terminal.....	123
6.1.2.3.24 Tuxpan Port Terminal.....	123
6.1.2.3.25 Kaohsiung Berth 120.....	125
6.1.2.3.26 Liverpool2.....	126
6.1.2.3.27 APM Terminals Lázaro Cárdenas	127
6.1.2.3.28 Tánger Med II.....	128
6.1.2.4 Terminales semiautomatizadas con el subsistema de almacenamiento parcialmente automatizado	129
6.1.2.4.1 Antwerp Gateway	129
6.1.2.4.2 GCT Bayonne	130
6.1.2.4.3 Norfolk International Terminals South	131
6.1.2.4.4 HHLA Terminal Burchardkai.....	133
6.1.2.4.5 Manzanillo International Terminal	134
6.1.2.4.6 Xiamen Ocean Gate Container Terminal	135
6.1.2.5 Estadísticas de las terminales semiautomatizadas.....	136
6.1.2.5.1 Estadísticas de terminales semiautomatizadas a nivel regional	138
6.2 Planificación.....	140
Capítulo 7. Innovaciones futuras en el ámbito de las TPC automatizadas....	144
7.1 Innovaciones en el subsistema de almacenamiento.....	144
7.2 Innovaciones en el subsistema de interconexión.....	149
7.3 Innovaciones en TICs	151
Capítulo 8. Conclusiones y futuras líneas de investigación y desarrollo	153
Referencias	157



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

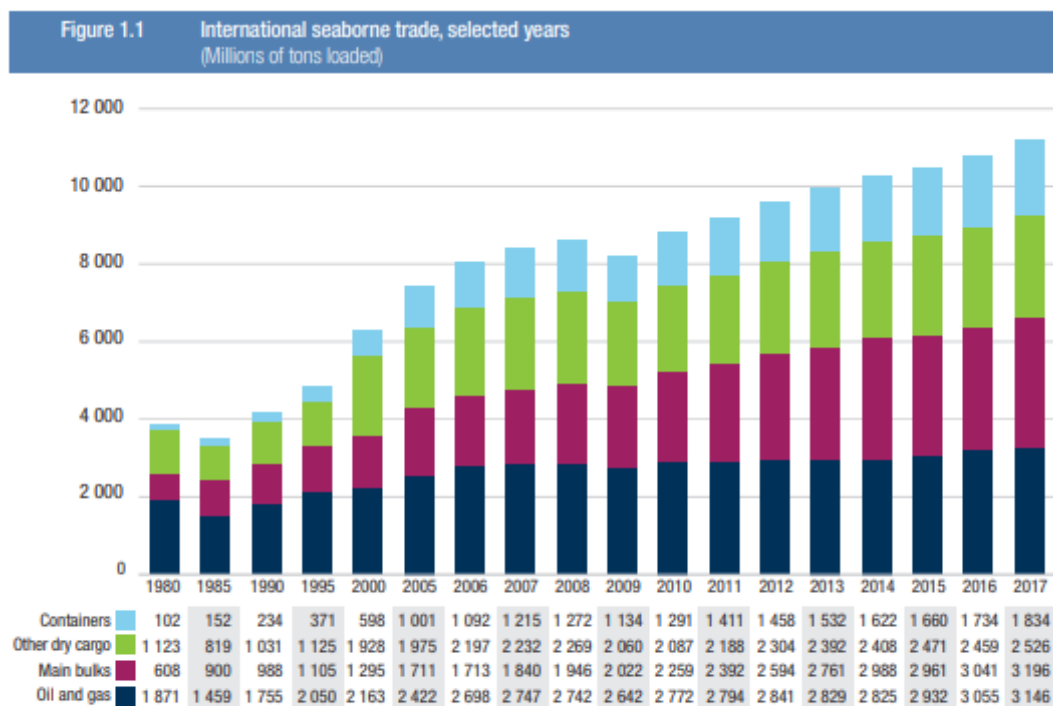
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE CAMINOS,
CANALES Y PUERTOS



Capítulo 1. Introducción.

Debido a los costes relativamente bajos del transporte marítimo, pudiendo llevar grandes cargas con un consumo energético bajo y con casi apenas necesidad de mano de obra a bordo (Rodrigue, 2013), y a la deslocalización de la producción de bienes, se ha conseguido paulatinamente, que aquella caja ideada por Malcom McLean, sea en la actualidad la estrella del transporte marítimo, teniendo el transporte marítimo de contenedores un crecimiento que dobla al de los otros tráficos marítimos por año (Branch, 2007), llegando a los 752 millones de TEUs (Twenty-Foot Equivalent Unit), en el año 2017.

Tal y como se muestra en la figura 1, el transporte por contenedor ha pasado de ser residual, en términos de toneladas cargadas, a tener órdenes de magnitud muy similares al resto de tráficos, pero lo más destacable no es el resultado final, sino, la evolución experimentada, con un asombroso crecimiento a partir del periodo 1995-2000.



Source: Review of Maritime Transport, various issues. For 2006–2017, the breakdown by cargo type is based on Clarksons Research, 2018a.

Notes: 1980–2005 figures for main bulks include iron ore, grain, coal, bauxite/alumina and phosphate. Starting in 2006, main bulks include iron ore, grain and coal only. Data relating to bauxite/alumina and phosphate are included under "other dry cargo".

Figura 1. Evolución de los diferentes tráficos en distintos años. Fuente (UNITED NATIONS CONFERENCE ON TRADE AND DEVELOPMENT, 2019).

Además, se debe de tener en cuenta la tendencia al gigantismo, con buques de más 18.000 y 20.000 TEUs, que tiene un claro efecto en el transporte marítimo, haciendo que aquellos buques que cuentan con una gran capacidad, ya no solo operen en las grandes rutas, como puede ser Europa-Asia, o la transpacífica, sino que operan principalmente en los puertos con mayores tráficos, actuando como un puerto de transbordo o *hub*, y de ahí repartir la carga a su destino a través de buques más pequeños (*feeder*), o viceversa (Mangan et al., 2008).

Esta tendencia al gigantismo se observa en la figura siguiente, en la cual se puede ver, en términos relativos, teniendo como base el año 2004, como la industria en 14 años ha reducido sensiblemente el número de buques y navieras, pero experimentando a su vez un gran aumento de la capacidad (en TEUs), como el tamaño del mayor buque construido.

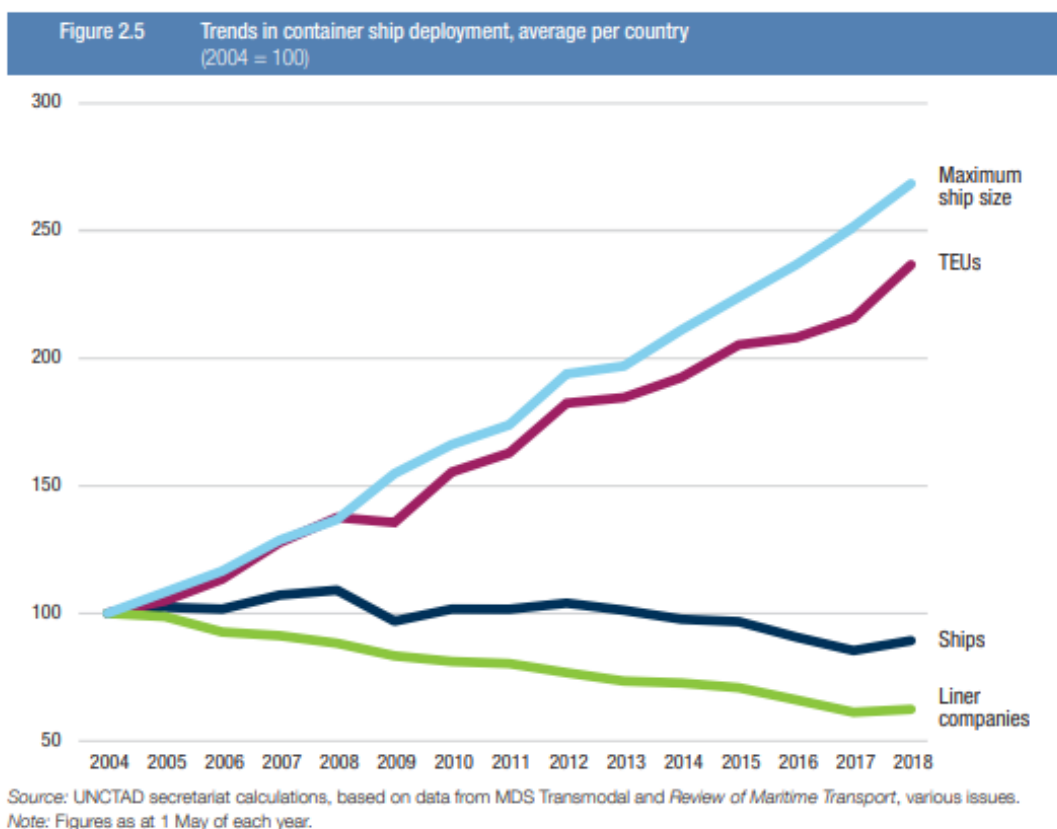


Figura 2. Tendencias en el transporte marítimo de contenedores. Fuente: (UNITED NATIONS CONFERENCE ON TRADE AND DEVELOPMENT, 2019).

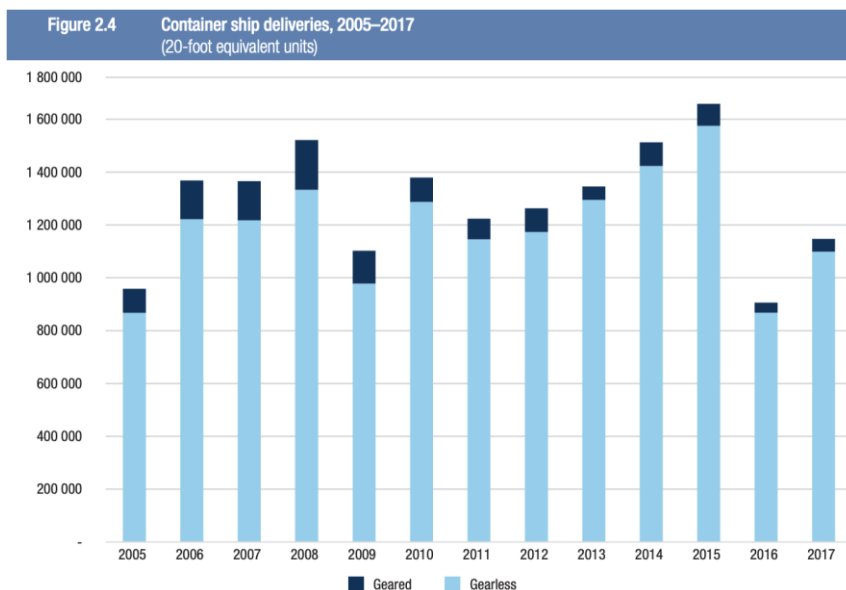


Figura 3. Entregas de buques portacontenedores en el periodo 2005-2017 en número de TEUs. (UNITED NATIONS CONFERENCE ON TRADE AND DEVELOPMENT, 2019)

Todo ello, y añadiendo la gran competitividad en el negocio del transporte marítimo, derivado en gran parte de un exceso de oferta del transporte marítimo. Esto repercute en una presión hacia los operadores de las terminales portuarias de contenedores desde las empresas navieras, persiguiendo “la máxima eficiencia en las operaciones, minimizando el tiempo de rotación del buque” (Monfort Mulinas, 2016).

Esa búsqueda por la eficiencia deriva en una tendencia de automatización de terminales portuarias de contenedores, teniendo un efecto, desde el punto de vista del operador de la terminal, de aumento de la capacidad de la misma (Monfort Mulinas et al., 2001).

Es precisamente por esta tendencia, cada vez más creciente, junto a los factores anteriormente enunciados, convierte la temática de este trabajo en muy relevante, debido a que no existe ningún precedente que una este avance del conocimiento, y, además, haciéndolo desde un punto de vista tanto teórico, como a nivel real.

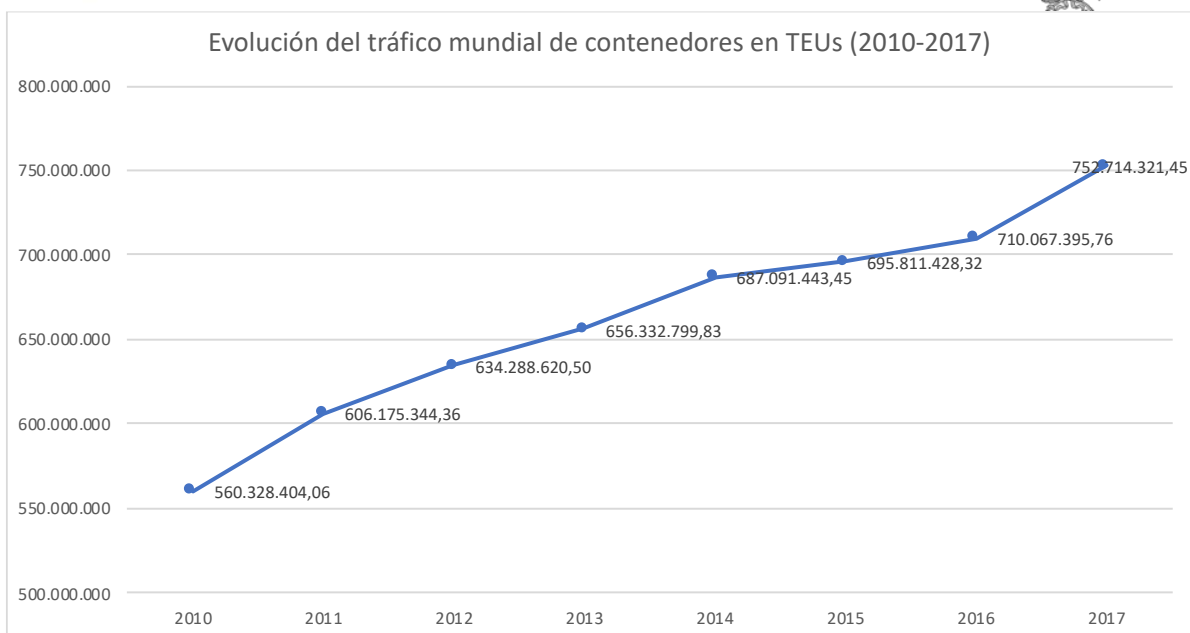


Figura 4. Evolución del tráfico mundial de contenedores en TEUs (2010-2017). Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de UNCTADstat (UNCTAD, n.d.).

1.1 La terminal portuaria de contenedores.

Una terminal portuaria de contenedores no debe ser entendida como un ente aislado, sino como un elemento de la cadena logística global, dividida a su vez en cuatro subsistemas, que son los siguientes:

- Carga y descarga de buques, el cual tiene lugar en el muelle, con elementos especializados y adaptados a los buques que se van a operar en el mismo, como son las grúas pórtico de muelle (Monfort Mulinas et al., 2011).
- Subsistema de almacenamiento de contenedores, es el elemento principal de una terminal portuaria de contenedores, ocupando la mayor parte de la superficie de esta última, permitiendo un almacenamiento temporal de los contenedores “permitiendo acompasar el ritmo y la capacidad de los distintos medios de transporte”. Las operaciones y el volumen de tráfico son las que determinan la superficie, disposición y maquinaria a emplear en el subsistema (Monfort Mulinas et al., 2011).
- Subsistema de recepción y entrega terrestre, en el cual se lleva a cabo la entrega del contenedor desde los diferentes modos de transporte terrestre (camión o ferrocarril) a la terminal. Se debe de distinguir entre

dos elementos dentro de este subsistema, la puerta terrestre, por la cual se accede, y el área de recepción y entrega. Ambos elementos son muy relevantes para la terminal, ya que se puede captar una gran información del contenedor, y así facilitar la operatividad de la terminal (Monfort Mulinas et al., 2011).

- Subsistema de interconexión, es aquel encargado de la conexión horizontal entre los diferentes subsistemas o zonas de la terminal, englobando tanto “el equipamiento elegido como las herramientas de la información necesaria” (Monfort Mulinas et al., 2011).

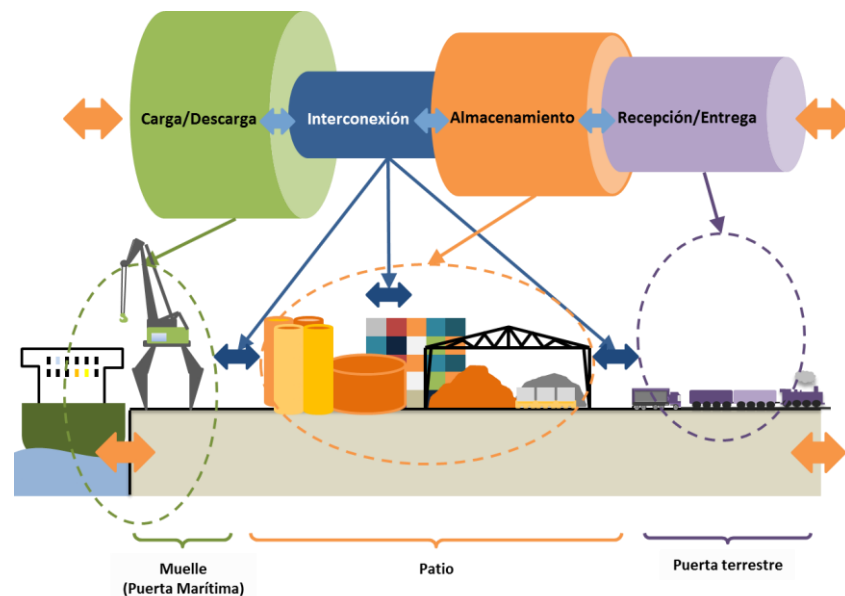


Figura 5. Esquema conceptual de los diferentes subsistemas de una terminal. Fuente: (Monfort et al. 2011)

1.2 Concepto de automatización en TPCs.

Para poder continuar prósperamente con el trabajo, se debe antes definir qué se entiende por automatización, y cuáles son sus variantes en su aplicación a las terminales portuarias de contenedores, para poder, de esta forma, conocer a qué nos estamos refiriendo cuando se habla de terminales automatizadas o semiautomatizadas.

El concepto de automatización, en general, va ligado a la sustitución del trabajo manual que realizan los seres humanos por máquinas o sistemas informáticos. Mientras que este concepto de trabajo ha estado presente durante muchos años en la industria convencional, su aplicación al campo de las terminales portuarias



de contenedores resulta muy reciente, en concreto, la primera terminal automatizada (ECT Delta) se inauguró en 1993 en el puerto de Rotterdam. Además, como se verá más adelante, la automatización de terminales portuarias de contenedores es una tendencia en auge.

A partir de lo dispuesto en el apartado anterior, se debe de hacer la distinción entre los dos grandes tipos de automatización en TPCs, la terminal automatizada, y la terminal semi-automatizada.

En primer lugar, se entiende que una terminal automatizada es aquella que tiene una completa automatización, o en su defecto, operación en remoto de todos los subsistemas que componen una terminal. Este último aspecto es relevante, debido a la dificultad de automatizar el subsistema de carga y descarga, por el gran hándicap que supone la automatización de una grúa que tiene que operar en un entorno que no está completamente estático como es el buque. En la actualidad, y siendo este avance muy reciente, las grúas completamente automatizadas que componen este subsistema no están completamente automatizadas, ya que se necesita una supervisión constante, y la ejecución de algunos movimientos por parte de este.

Se entiende por terminal semi-automatizada aquella que tiene, al menos, un subsistema automatizado. Por lo general, esta tipología de terminales suele tener automatizado el subsistema de almacenamiento (patio), en el caso de aquellas terminales con un bajo grado de automatización. Por el contrario, aquellas terminales que cuentan con un alto grado de automatización les suelen faltar por automatizar la interfaz marítima, debido a las dificultades comentadas anteriormente.



Capítulo 2. Problemática.

Un estudio de este tipo, relativo a la automatización de terminales de contenedores, no ha sido planteado en ningún momento, siendo enfocada la mayor parte de la literatura académica en resolución de problemas individuales, en la mayoría de los casos relativos a la optimización de la terminal, un subsistema, o una parte de este. También una de las problemáticas ha sido una dicotomía entre los problemas resueltos y el propio avance de la innovación, en muchas ocasiones solo enunciada por parte de las empresas del sector, y siendo esta tendencia de automatización de terminales muy reciente. Los trabajos con un mayor parecido, aunque sustancialmente diferentes -debido a que el presente trabajo es mucho más específico- son los llevados a cabo por H. Carlo, Iris Vis y Roodbergen, en una serie de publicaciones (Carlo et al., 2015) (Carlo et al., 2014a) (Carlo et al., 2014b) donde estudian en cada una de ellas, el Estado del arte de un subsistema de la terminal y futuras investigaciones. Cabe mencionar, que estos estudios fueron muy relevantes, ya que, si se observa el número de citas, todas ellas superan las 100 citas, número muy superior a la media de la revista, que está sobre las 6. Como antecedente mucho más específico cabe mencionar el trabajo llevado a cabo por los profesores Aguilar y Monfort, entre otros autores, en el cual se trató en su momento el estado de avance de la automatización de terminales, así como las perspectivas de futuro que estas tenían (Monfort Mulinas et al., 2001).

Es, por tanto, que este trabajo se centra en unir esa parte académica, con la parte profesional, viendo los avances propuestos por parte de los fabricantes de maquinaria. Además, también se va a tratar las futuras innovaciones que pueden ser aplicadas en un futuro, viendo diferentes propuestas tanto en literatura académica, como en proyectos financiados con fondos europeos. Además, se plantea un análisis de todas las terminales automatizadas y semiautomatizadas al final del trabajo, para poder evaluar, una vez visto el avance del conocimiento a nivel teórico, qué partes se han aplicado, y de qué forma ha ido evolucionando su aplicación real en el tiempo.

Más en detalle, el tratamiento de la literatura académica se va a realizar en base al estudio y enumeración de los principales problemas resueltos en la misma, principalmente centrándose en los problemas más recientes publicados en las revistas que tengan un alto índice de impacto.



Capítulo 3. Metodología y organización del trabajo.

En primer lugar, en el capítulo 4, se va a realizar un Estado del Arte de la automatización de terminales. Esta se va a abordar a partir del estudio de los diferentes subsistemas, y dentro de cada subsistema, la automatización del diferente equipamiento que lo compone. Para llevar esa tarea a cabo, se va a consultar distintas publicaciones de los principales fabricantes de maquinaria portuaria, proveedores de las tecnologías de automatización y publicaciones del sector. En concreto, se han consultado las siguientes:

- ABB Marine
- Kalmar
- Konecranes
- TTS Marine
- Port Technology

Posteriormente, se va a revisar la literatura académica para ver los estudios que se han llevado a cabo. Esta revisión se va a realizar consultando las revistas con un alto índice de impacto, y aquellos artículos publicados en los últimos 10 años, aunque dependiendo de la cantidad de artículos publicados en alguno de los apartados esta búsqueda se ampliará como máximo a revistas con un cuartil q2, y en cuanto al periodo temporal, este se podría ampliar como máximo a artículos publicados en el año 2003. Cabe mencionar que esto no es aplicable si se consulta alguna Tesis Doctoral, únicamente considerando en esta el impacto o precedente que sentó en un campo de estudio específico.

Más en detalle, se han consultado las siguientes revistas:

- European Journal of Operational Research
- International Journal of Production Economics
- Journal of Applied Economics
- Journal of Transport Geography
- Ocean Engineering
- Reliability Engineering & System Safety
- Surveys in Operations Research and Management Science
- Transportation Research Part A: Policy and Practice
- Transportation Research Part B: Methodological
- Transportation Research Part C: Emerging technologies
- Transportation Research Part D: Transport and Environment
- Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review



- Annals of Operations Research
- Journal Marine Science and Technology
- Journal of the Operational Research Society
- Applied Economics
- Naval Research Logistics

Posteriormente, se plantea un análisis de las terminales existentes, tanto automatizadas, como semiautomatizadas, en servicio, así como las que estén en fase de proyecto, construcción o se dé el caso de terminales convencionales que estén en proceso de automatización, y se tenga constancia de las mismas. En el caso de estas últimas, no se va a entrar en detalle, únicamente se realizará un listado, en el caso que estén en construcción, y se tratará de profundizar en el caso de que la implantación de la automatización en una terminal existente se encuentre en un proceso avanzado.

En cuanto el caso de las terminales existentes, se plantea realizar un análisis de tipo cuantitativo. Para ello, se va a seguir los siguientes pasos:

- Localización de las terminales
- Toma de datos a partir de imágenes tomadas por satélite, fotografías, visionado de vídeos de la terminal y consulta de información en la página web del operador o terminal u otras que sean relevantes
- Tratamiento de datos

En concreto, se va a caracterizar las terminales, midiendo parámetros como línea de atraque, superficie, maquinaria en cada subsistema, longitud, anchura y altura de apilado de los bloques, principalmente para posteriormente poder realizar cálculos de capacidades y algunos otros, en base a los datos que finalmente sea posible obtener.

Con ello se pretende tener una visión global y en base a datos objetivos de los recursos y tipología de las terminales de contenedores automatizadas, y determinar si existen o no algunos criterios comunes a nivel de diseño del layout de la terminal. Además, también se busca realizar una comparativa entre las terminales situadas en distintas regiones geográficas, en el caso que se encuentren diferencias notables.

Posteriormente, se hablará sobre los aspectos más relevantes a nivel de planificación que se deben de tener en cuenta para una terminal automatizada. Para ello, se ha consultado algún artículo, y principalmente libros.



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE CAMINOS,
CANALES Y PUERTOS



Seguidamente, se verán las innovaciones futuras que pueden ser implantadas, o estén en proceso de implantación, aplicables a la automatización de terminales. Para llevar a cabo esta tarea, se han consultado algunos artículos académicos, pero principalmente, proyectos financiados con fondos europeos.

Finalmente, se finalizará con unas conclusiones y futuras líneas de investigación y desarrollo.



Capítulo 4. Automatización de los elementos y subsistemas que componen una terminal portuaria de contenedores

4.1 Subsistema de carga y descarga de buques.

Tal y como se mencionó en el apartado anterior, el presente subsistema resuelve la carga y descarga de los contenedores en el buque, haciendo de puerta marítima, usualmente con las grúas pórtico de muelle. Las grúas **STS (Ship-to-shore)**, son muy importantes para la productividad (movimientos/h o TEU/h) del conjunto de la terminal, y por ende para su correcta explotación y éxito comercial de la misma (Bryfors, 2014). Y la tendencia hacia el gigantismo hace que se necesiten grúas con un izado y movimientos más rápidos, debido a las grandes distancias, 70 metros de alcance y 50 m de altura bajo spreader, ya que en otras condiciones se tendrían escalas inasumibles para la naviera.

La automatización de las grúas STS consiste en las funciones que se enumeran a continuación (Bryfors, 2014):

- Continuo control de la inclinación y del balanceo de la carga
- Perfilado del buque y control del camino óptimo
- Identificación OCR en contenedores y vehículos
- Medición de la posición de los vehículos y guiado de los vehículos
- Descarga automática de contenedores automático en plataformas, en el suelo y en vehículos
- Única interfaz con el **sistema operativo de la terminal (TOS)** para órdenes de trabajo, contenedores e información de vehículos

Más en detalle, respecto a estas funciones, el control de la inclinación y balanceo es básicamente una compensación de los movimientos dinámicos que sufre el contenedor durante las operaciones.

Por otro lado, otro aspecto que puede ser difícil de entender es el perfilado del buque. Esta funcionalidad lo que hace es a partir de un sistema láser, capturar la disposición de los contenedores en el buque, y a partir de ello, optimizar los movimientos verticales del contenedor.

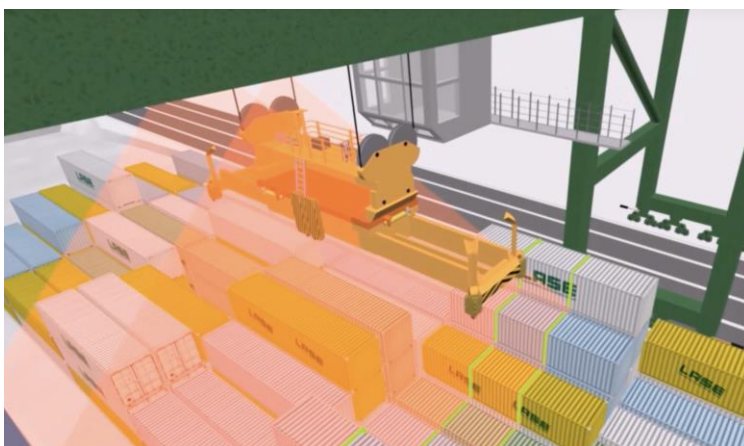


Figura 6. Proceso de perfilado de buques. Fuente: (LASE GmbH, n.d.)

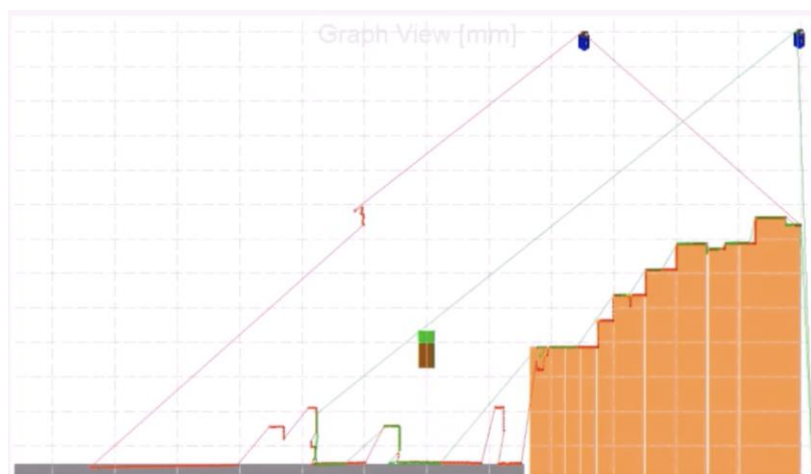


Figura 7. Ejemplo de software de perfilado de buques. Fuente: (LASE GmbH, n.d.)

Las ventajas principales que tiene la automatización de este subsistema son:

- Menor exposición al riesgo por parte de los trabajadores
- Entorno de trabajo más confortable
- Menor pérdida de tiempo de trabajo durante cambios de turno



Figura 8. Puesto de control remoto de grúa STS en APM Terminals Maasvlakte II. Fuente: ABB Marine.

Otro sistema, que, pese a no ser propio de la grúa, ni ser considerado como un elemento que automatice elemento alguno de la terminal, pero que puede ser una ayuda a automatización de las grúas pórtico de muelle, son los llamados sistemas **auto-mooring**, consistentes en la realización de un sistema de amarre con mayor limitación de los movimientos del buque, resolviendo de esta forma la problemática relativa a la automatización por el movimiento del buque amarrada, anteriormente comentada. Entre los sistemas existentes destaca el MoorMaster de la empresa Cavotec.



Figura 9. Sistema MoorMaster. Fuente: Cavotec.

Actualmente, el sistema más empleado para la automatización de grúas STS es el **double trolley**. Este consiste en la presencia de dos carros en la grúa: uno principal que se encarga de la interfaz marítima, esto es, la carga y descarga de los contenedores en el buque, y de un carro secundario, encargado de la carga y descarga de los contenedores a los sistemas de interconexión de la terminal. Los movimientos de ambos carros están “conectados” por la presencia de una plataforma intermedia, en la cual se deposita el contenedor para que posteriormente lo maneje el otro carro distinto al que lo ha depositado. Esto, además de la facilidad de automatización que se comentará a continuación, tiene la gran ventaja, desde el punto de vista en la operativa conjunta de la terminal, de desacoplar los movimientos por parte de ambos carros (Chao and Lin, 2011).

Mientras que la automatización del carro principal resulta difícil por lo motivos ya expuestos anteriormente, siendo en muchos casos un sistema semiautomatizado. En este sistema, el operador solo tiene que realizar manualmente la descarga o carga del contenedor del buque, siendo el resto del ciclo automático. Esto se debe a que la automatización del sistema comprendido desde la plataforma intermedia hasta el suelo o vehículo correspondiente resulta relativamente fácil de automatizar.



Figura 10. Grúas double trolley en APM Terminals Maasvlakte II. Fuente: APM Terminals Flickr.

Se ha de hacer mención de que el coste de adquisición de una grúa con el sistema *double trolley* es ligeramente mayor que una convencional estando en el entorno de 12 a 15 millones de dólares (Monfort Mulinas et al., 2012).

Además, también se debe de comentar la problemática que puede suponer este sistema de grúa para el caso que se deba de realizar una carga/descarga de una carga *oversize*, debido al obstáculo que supone la plataforma intermedia para el mismo (Chao and Lin, 2011).

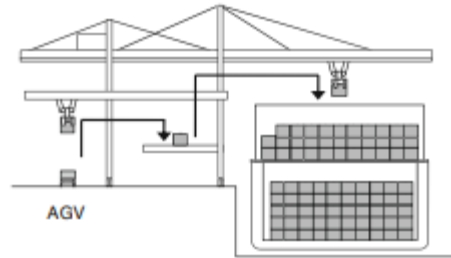


Figura 11. Dibujo conceptual de una grúa STS con sistema double-trolley. Fuente: (Bae et al., 2011).

	Conventional	Double trolley	Twin 40-ft single trolley	Twin 40-ft double trolley
Lifting capacity (t)				
Double/twin spreader	–	–	80	80
Single spreader	40–65	57–61	65	65
Under cargo beam	75–100		100	
Fore trolley speed (m/s)				
Hoisting speed full	0.4–1.5	1.2–1.3	1.5	1.5
Hoisting speed empty	0.8–3.0	3.0	3.0	3.0
Aft trolley speed (m/s)				
Hoisting speed full	–	4.0	–	4.0
Hoisting speed empty	–	0.5–0.8	–	0.8
Boom up time single (s)	180–300		300	
Hoisting/lift height (m)				
Fore trolley				
Above rail top	36	38.5–42.0	41	≥41
Below rail top	14	20.0–23.0	19.5	
Aft trolley	–		–	15
Maximum outreach (m)	30–65	61–63	68	≥63
Back reach (m)	15	16–25	23	19
Rail span (m)	30.5	35.0	30.5	35.0

Figura 12. Comparación de especificaciones de diferentes grúas STS. Fuente: (Stahlbock and Voß, 2007)

A la hora de planificar una terminal, la selección de los equipos o tipo de maquinaria que opera en el subsistema de interconexión tiene una fuerte influencia en la selección del tipo de grúa. Esto se debe a que diversas investigaciones han concluido que el rendimiento de una grúa de muelle con el sistema *double trolley* tiene una mayor eficiencia si se opera con **ALVs (Automated Lifting Vehicles)**, que con **AGVs (Automated Guided Vehicles)** (Yan et al., 2014). Siendo la elección de este tipo de grúas una preferencia si trabajan “en cooperación con AGVs” (Chao and Lin, 2011).



Se debe de tener especial consideración que la puerta marítima suele ser el subsistema que mayor limitación impone a la capacidad total de una terminal, oscilando la productividad de cada grúa entre 25 y 30 movimientos por hora (Chao and Lin, 2011).

Además, también se habla de la ventaja de usar el concepto o sistema de “**double cycle**” en las operaciones de este subsistema. Este consiste en que dentro del mismo ciclo se produzcan dos operaciones (carga y descarga), es decir, una grúa carga un contenedor al buque, y en lugar de que el carro vuelva a por otro para cargarlo, se descarga uno del buque, para volver a iniciar otro ciclo, optimizando así los movimientos de la grúa, aumentando la productividad y la eficiencia. Además, se ha demostrado a través de simulaciones que no solo afecta en la productividad del subsistema de carga y descarga o de cada grúa de muelle, considerada a nivel individual, sino que aumenta la eficiencia en toda la terminal (Zhang et al., 2019).

En cuanto a los problemas tratados en el ámbito académico, se deben de hacer mención de los problemas de *schedulling*, o de programación de grúas STS. Estos problemas no se van a tratar en profundidad en el presente trabajo académico debido a que son problemas que sirven de igual forma para terminales convencionales como a automatizadas. Pese a ello, sí que se ha llegado a indagar sobre ciertos problemas de *schedulling* basados en la interacción de grúas STS y AGVs (*Automated Guided Vehicles*), en definitiva, en un entorno propio de una terminal de contenedores automatizada. Los problemas de optimización conjunta se verán todos ellos en un apartado diferente al del presente subsistema.

Es importante destacar que los sistemas de interconexión (AGVs principalmente) y grúas de muelle en terminales automatizadas es recomendable estudiarlos de forma conjunta, por la influencia que los AGVs tienen, tanto en las grúas de muelle, pero también en el subsistema de almacenamiento, pudiendo causar retrasos, esperas y congestión, en caso de no haber una optimización conjunta (Yang et al., 2018). Es por ello, la especial relevancia que tienen los problemas conjuntos, ya sean de las STS junto a la interconexión, interconexión junto al subsistema de almacenamiento, y de STS, interconexión y almacenamiento, debido a que así la terminal puede alcanzar su máxima eficiencia y capacidad, siendo esto relevante, para poder minimizar las inversiones en equipamiento, que con una programación y asignación adecuadas, tratando de optimizar los tiempos de espera y el consumo energético, se ahorraría el operador de la terminal, maximizando de esta forma su beneficio.



4.2 Subsistema de almacenamiento.

El presente subsistema objeto de estudio resulta especialmente relevante, ya que, desde la operación de descarga de un buque, y la recogida por parte del importador, en caso de que se trate de un contenedor de importación, o la llegada a la terminal de un contenedor de exportación, e incluso de un contenedor de transbordo, se debe dejar el mismo durante ese desfase temporal de entrada/salida entre operaciones. Es por ello, que, con el objetivo de maximizar la eficiencia de la terminal, no es suficiente con la automatización de las grúas que conforman este subsistema, sino que, además, se debe de tener unas claras reglas respecto al almacenamiento, para tratar de minimizar movimientos innecesarios, tanto verticales, como horizontales.

En el presente subapartado se va a ver, en primer lugar, la diferente maquinaria existente para la automatización de una terminal, para posteriormente pasar a la situación en la literatura académica.

En este subsistema existen tres tipos básicos de maquinaria empleada, que son, en definitiva, las que confieren las características y tipología básica en una terminal, debido a que la disposición de bloques va ligada a la primera.

En primer lugar, se encuentran los **ARMG (Automated Rail Mounted Gantry Crane)**, también conocidos como **ASCs (Automated Stacking Cranes)**. Este es básicamente una grúa pórtico sobre raíles, la cual se verá con mayor detenimiento en el próximo apartado, al igual que la demás maquinaria empleada en este subsistema. Por otro lado, se tienen los **ARTG (Automated Rubber-Tyred Gantry Crane)**, que son grúas pórtico sobre neumáticos. Además, también se tiene el **OHBC (Overhead Bridge Cranes)**, grúa sobre pórticos de hormigón.

Por último, se tienen los llamados **ALV (Automated Lifting Vehicles)**, también conocidos como **Automated Staddle Carriers**, que pese a ser el componente básico de un tipo de subsistema de almacenamiento, se da la peculiaridad de que también realiza la interconexión, y, por tanto, se ha decidido incluirlo en el apartado del subsistema de interconexión.

4.2.1 ARMG/ASC.

Como ya se ha mencionado anteriormente, los ARMGs son pórticos que se desplazan sobre raíles, pudiendo tener dimensiones mucho mayores a los pórticos sobre neumáticos, llegando hasta 20 contenedores de ancho, “aunque lo más habitual es anchura de 6 u 8” (Monfort Mulinas et al., 2012). En cuanto al apilado de contenedores, se puede llegar a apilados de 8+1, siendo lo más habitual 4+1 o 5+1 contenedores (Monfort Mulinas et al., 2012). Debido a su naturaleza -debido a que circula sobre raíles- es relativamente fácil su automatización. De hecho, fue el primer sistema usado en ECT Delta, en el año 1993. En comparativa con los ARTG, estos últimos tienen velocidades de desplazamiento menores, siendo en torno a los 2 m/s, mientras que los ARMGs tienen velocidades entre 3 y 4 m/s (Kempe, 2012).

En comparativa con otros sistemas empleados en el almacenamiento, los ASC tienen una serie de ventajas tales que, permiten mantener unos costes operativos bajos, una gran utilización del espacio del patio, y gran disponibilidad, características que hacen maximizar la capacidad de este subsistema (Gharehgozli et al., 2017).

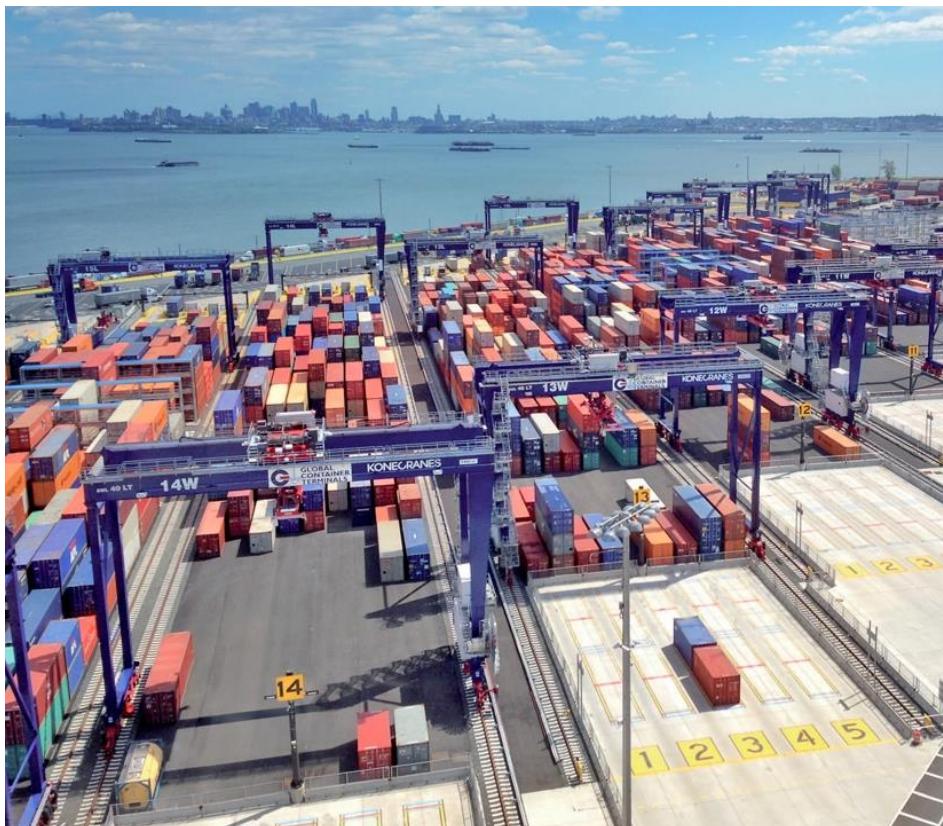


Figura 13. Ejemplo de ARMG. Fuente: (Konecranes, n.d.).

En cuanto a la tipología de bloque formado, este es perpendicular al muelle, teniendo este, usualmente, una longitud de en torno a los 300 metros. Cabe destacar que, en los extremos finales de cada bloque, se encuentran unas zonas de recogida y entrega de contenedores, tal y como se puede observar en la imagen a continuación, donde en la parte superior se encuentra el buffer destinado a la interconexión con las grúas de muelle, y en la parte inferior la recepción de contenedores desde camiones de calle. Pese a que por lo general es perpendicular, puede haber casos en los que el bloque sea paralelo al muelle, e incluso oblicuo.

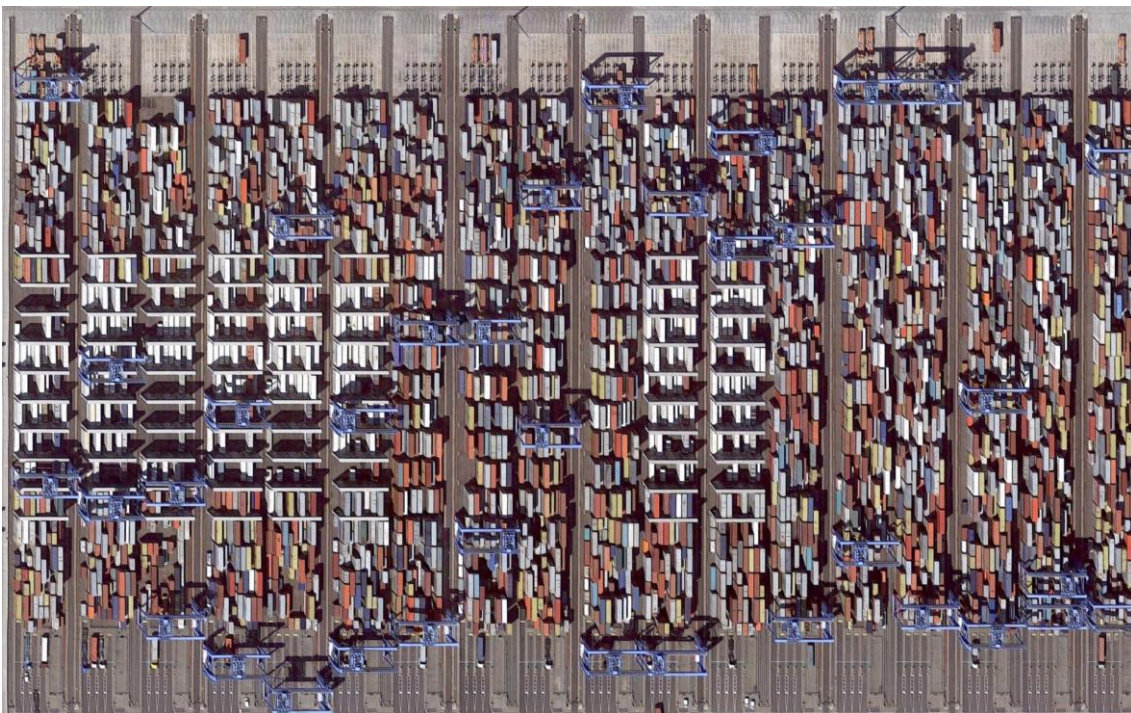


Figura 14. Bloques de ARMG en APM Terminals Maasvlakte II. Fuente: Google Maps.

Más en detalle respecto al tamaño del bloque, se tiene que es preferible ir a bloques más largos o anchos en lugar de bloques con una mayor altura de apilado. Siendo lo primero preferible para bloques que usen en sistemas con grúas pasantes, ya sean dos por bloque (**DRMG**) o tres por bloque (**TRMG**), mientras que un bloque más ancho resulta más ventajoso para bloques con un solo RMG por bloque o dos grúas no pasantes (Kemme, 2012). En general, se tiene que los mejores rendimientos los obtiene el sistema TRMG, y los peores en los casos en los que solo hay un RMG por bloque, mientras que en bloques donde hay dos grúas en el mismo las pasantes (DRMG) tienen unos rendimientos ligeramente peores que las no pasantes (Kemme, 2012). En un estudio posterior esto último es refutado, concluyéndose en el mismo que el

DRMG tiene un rendimiento superior del 6% respecto de las no pasantes, siendo esta ventaja mucho más visible en tráficos import/export, donde las distancias a recorrer son mayores (Speer and Fischer, 2017). En general, esta ligera diferencia tiene que ver con el método en el cual se produzca la programación, ya que esto es evaluable en problemas de scheduling en los cuales exista una simulación numérica. Cuando se usan reglas de prioridad para la programación esta diferencia es ínfima, mientras que si se usa un algoritmo de ramificación y poda (Branch & Bound) esta diferencia se ve agrandada en favor del DRMG (Speer and Fischer, 2017).

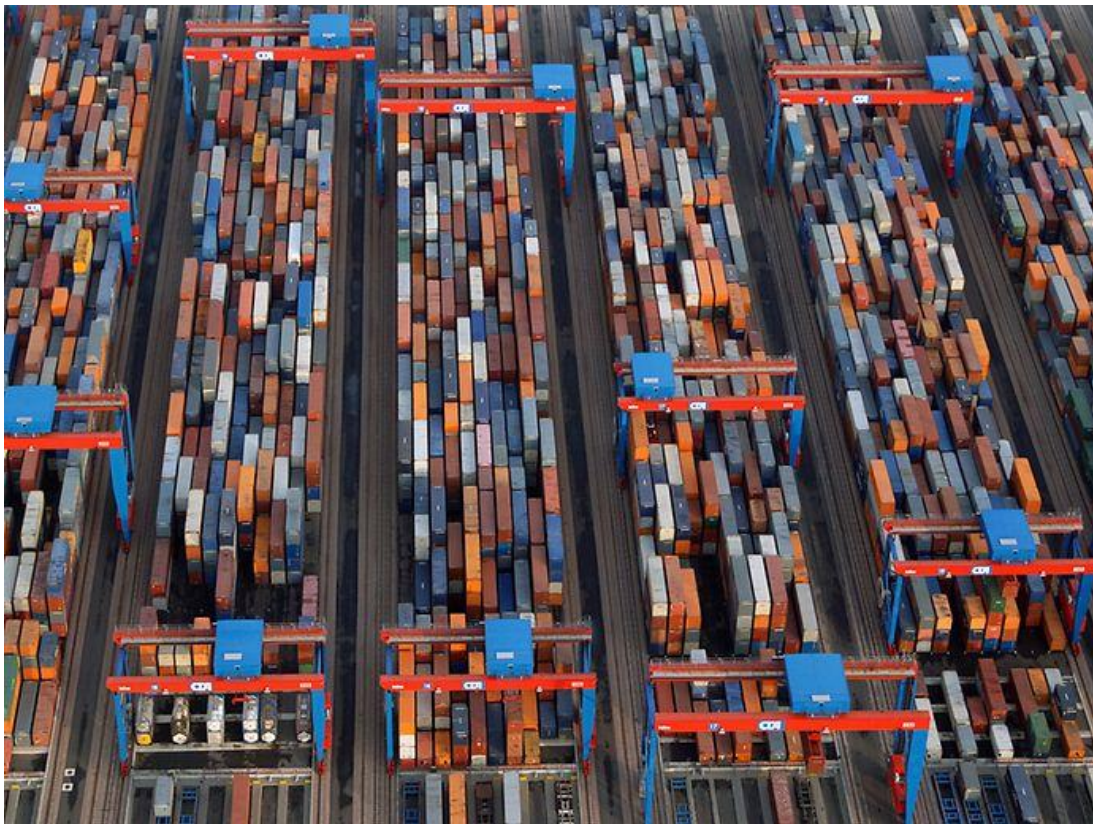


Figura 15. Ejemplo de DRMG en CTA Hamburg. Fuente: ("Container in Hamburg - HHLA," n.d.).

Como se ha comentado anteriormente, puede haber casos, especialmente en los que se use el **CARMG (Cantilever Automated Rail Mounted Gantry)**, que el bloque sea paralelo al muelle, como es el caso de la terminal Pasir Panjang 4-6, en Singapur. En este caso no existe buffer en los extremos, sino que la recogida se realiza a través de un carril paralelo al bloque, aprovechando el voladizo.



Figura 16. Patio de CARMGs en Pasir Panjang Terminal 4-6. Fuente: Google Maps.

Al igual que sucede con las grúas de muelle, esta funciona sin operador a bordo, aunque es necesario en algunas operaciones una supervisión y la toma de control puntual. Esta toma de control es obligatoria, en muchos casos, en las operaciones que implican a los camiones externos, ya que por razones de seguridad se deben realizar en modo semiautomático, siendo la última fase de la operación manual (Kemme, 2012). En este último aspecto puede haber excepciones, debido a que algunas terminales, como TraPac Los Angeles o Maasvlakte II, no necesitan de esta última fase manual y realizan toda la operación de modo automático, siendo únicamente necesario una supervisión (Kalmar, 2015).

En cuanto los inconvenientes de este sistema, se tiene principalmente una rigidez, ya que no es posible la modificación de la terminal sin la ejecución de obras. También se deben tener en cuenta las grandes cargas inducidas, que son muy superiores a los de otros sistemas. Por último, debido a la poca flexibilidad comentada anteriormente, se deben tener dos ARMGs por bloque, teniendo el inconveniente de que no se pueden cruzar si son del mismo tamaño, y en caso de que no lo sean (DRMG o TRMG), la capacidad de almacenamiento disminuye.



4.2.2 ARTG

Los ARTG (Automated Rubber Tyred Gantry) es el otro equipamiento que puede conformar el subsistema de almacenamiento, siendo usuales en terminales semiautomatizadas, ya que, en contraposición a los ARMG, aportan mayor flexibilidad y son fácilmente aplicables a terminales ya en servicio, sin necesidad de obras o de interrupciones de servicio, siendo el tiempo de conversión de entre 12 y 18 meses, siendo tan alto principalmente por los cambios en el TOS (Terminal Operating System). Una problemática que tiene esta maquinaria son los conflictos con el tráfico, aspecto que se explicará con más detenimiento posteriormente, en el presente apartado. En cuanto a la capacidad de bloque que pueden tener los ARTGs, estos pueden apilar como máximo 5 contenedores, con una anchura máxima de 7 contenedores, más el carril para camiones (Konecranes, 2013). En cuanto a la disposición y longitud de cada bloque, estos son paralelos al muelle, y tienen una longitud de un atraque.

Además de las ventajas en cuanto a flexibilidad mencionadas en el párrafo anterior, a ello se le debe unir el coste de inversión, ya que cada RTG puede suponer un ahorro de entre 500.000 \$ y 1,1 M \$ respecto de un ARMG (Cerderqvist and Holmgren, 2010) (Rintanen and Thomas, 2016) – nótese que la comparación es entre un RTG sin automatizar y un ARMG, probablemente la automatización del RTG suponga un coste adicional, pero no excesivo -, pudiendo incluso automatizar los RTG existentes de la terminal, con el consiguiente ahorro de capital (Alho et al., 2018).

Anteriormente, se ha hecho mención de la facilidad de automatizar los RMGs, en comparativa con los RTGs. Esto sucede por la propia naturaleza de este último, ya que puede suceder que haya desniveles u otro tipo de irregularidades en la superficie del pavimento, además de las tolerancias de los neumáticos y del área de almacenamiento, aunque estos problemas han sido resueltos (Gylling, 2013). También se ha de hacer mención, que, a diferencia de los ARMGs, que suelen usar energía eléctrica, los ARTGs, pueden funcionar con energía eléctrica, ya sea con arrollamiento de cable o con cable enterrado, o con generadores diésel (Konecranes, 2013).

El guiado de los ARTGs se realiza a través de raíles virtuales (Gylling, 2013), siendo el posicionamiento del pórtico posible gracias al uso de dos antenas de **GPS diferencial (DGPS)**, con dos bases redundantes en la terminal (Konecranes, 2013). Las antenas colocadas en el ARTG únicamente precisan de una limpieza cada seis meses o un año, dependiendo del entorno operacional (Kalmar, n.d.). Para facilitar la operación en la terminal, las coordenadas virtuales



son transformadas a las coordenadas que cada operador establezca (Kalmar, n.d.).

Otra ventaja que da este sistema es que, al igual que sucede con los RTGs convencionales, los automatizados también tienen la posibilidad de cambiar de bloque, identificando sin intervención humana, los raíles virtuales por los que debe de ir (Kalmar, n.d.).

Una gran diferencia que tienen los ARTGs respecto a los ARMGs es el modo de cargar y descargar un contenedor, ya sea respecto a un camión externo, o un camión de terminal, debido a que no existe una zona fija, y que el camión se posiciona en el carril exterior, en la misma posición transversal en la cual va a ir o se encuentra el contenedor objeto de operación (Kempe, 2012). Esto también puede suceder en terminales semiautomáticas con CARMG, tal y como se vio en el apartado 2.2.1, teniendo como ejemplo la terminal 4-6 de Pasir Panjang en Singapur. En el caso de no existir tal voladizo, se produce un problema de seguridad, debido a que en los ARTGs no existe una separación física de los camiones respecto de las grúas, ya que en los ARMGs u otros, esto se realiza con un vallado (Gylling, 2013). Esto implica que se deban encontrar áreas donde se puedan realizar las operaciones con los camiones de una forma segura, siendo lo más sencillo crear un carril vallado para los vehículos, pudiendo añadir puntos de salida en el caso que los bloqueos de tráfico sean frecuentes, tal y como se puede observar en la siguiente figura (Gylling, 2013).

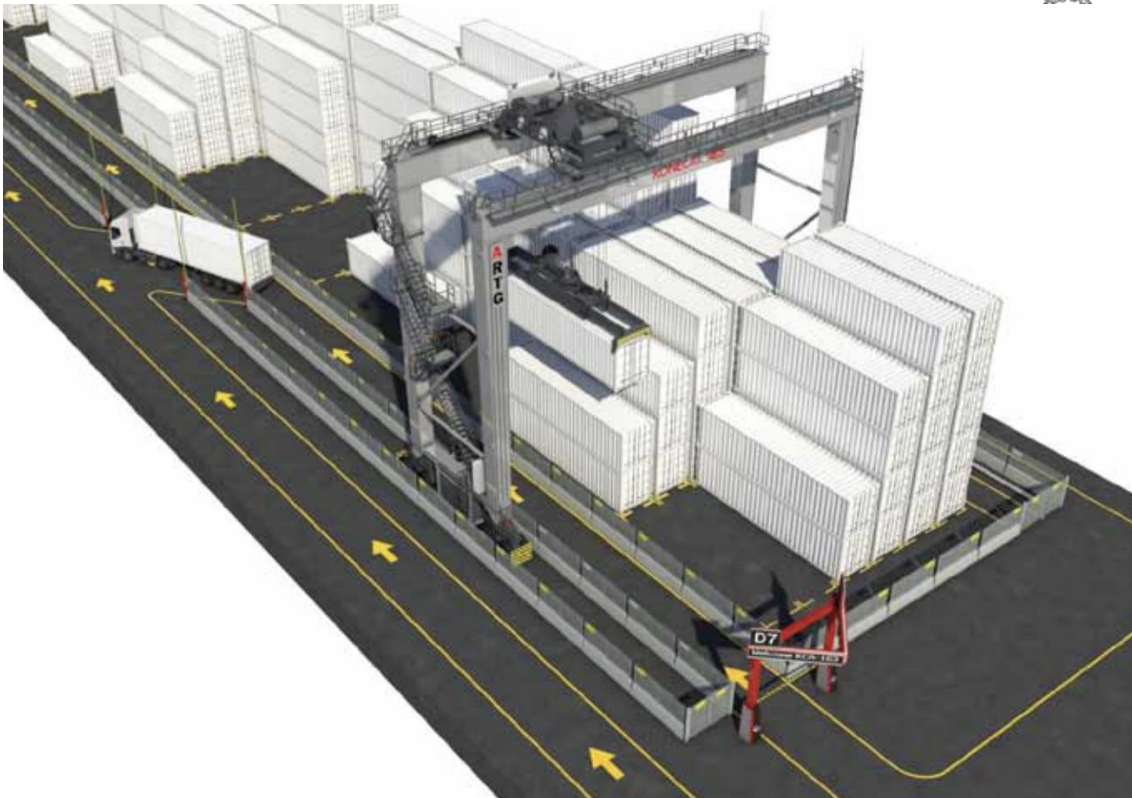


Figura 17. Ejemplo de layout de un ARTG con carril vallado. Fuente: (Gylling, 2013).

Al igual que en los ARMGs, la carga y descarga de los camiones se hace de forma manual, habiendo una supervisión continua, siendo posible que una persona supervise hasta 6 ARTGs (Konecranes, 2013).

También se reportan ahorros energéticos debido a una operación óptima (Alho et al., 2018), siendo junto a los costes laborales, los mayores ahorros económicos que la automatización de RTG produce.

La forma o grados de automatización de RTGs puede ser gradual, desde la operación remota, que tiene la principal ventaja de ahorro de tiempo del operador, ya que no se requiere un desplazamiento a la grúa, especialmente en periodos con poca demanda. Posteriormente, se va a las fases de supervisión de movimientos, automatización de los movimientos del carro y pórtico, y finalmente una completa automatización que involucre las operaciones con los camiones sin necesidad de intervención humana.

4.2.3 OHBC

Otro tipo de maquinaria específica empleada en el subsistema de almacenamiento es el Overhead Bridge Crane (OHBC), que consiste en una grúa sustentada en una serie de pórticos de hormigón. Esto le permitía tener una mayor altura de apilado. Este sistema, implantado en 1997, no es completamente automatizado, ya que se limita a ser manejado remotamente (Gustafsson and Heidenback, 2002), aunque sentó un precedente, ya que fue la primera grúa en el entorno portuario a ser controlada por remoto. Pese a que se sigue usando, su implantación solo se llevó a cabo en la terminal 1 de Pasir Panjang (Singapur).



Figura 18. OHBC en Pasir Panjang. Fuente: Google Maps.



4.3 Subsistema de interconexión

Tal y como se ha visto anteriormente, dependiendo de la tipología de la terminal, el subsistema de interconexión puede tener diferentes misiones, además de haber un gran catálogo de posible maquinaria para la automatización de este, siendo normalmente el segundo paso para la automatización, tras el almacenamiento (o tercero, si se considera el subsistema de recepción y entrega).

Por lo general, solo existe en las terminales automatizadas una interconexión, entre el almacenamiento y el muelle, pero puede suceder que haya dos interconexiones, una, la ya mencionada, y otra entre el subsistema de recepción y entrega y el almacenamiento.

Este subsistema ha sido el más estudiado en la literatura académica, sobre todo a partir del momento de aplicación a las terminales de contenedores, siendo el momento de mayor auge a finales de los 90 y principios del presente milenio. En especial, el elemento estrella de este subsistema: los AGVs, debido a que fue el primer vehículo que se aplicó en ECT Delta en 1993, y a la gran implantación que este tiene en las terminales automatizadas. Es precisamente en la terminal citada anteriormente, donde los AGVs, ampliamente usados en la industria convencional, daban el salto a una aplicación portuaria. Aunque el AGV es el sistema con mayor implantación, no es la única alternativa, ya que existen variantes del mismo, como los Lift-AGV, o sistemas completamente diferentes, tales como los ALV, IAV, entre otros. Los problemas comunes que se pueden estudiar para cada uno de los diferentes tipos de vehículos automáticos son, rendimiento operacional, ruta óptima, programación, comparación entre ellos, etc.

4.3.1 AGVs

Los Automated Guided Vehicle (AGV) son un tipo de vehículo automatizado, que se caracterizan por no tener cabeza tractora, siendo una simple plataforma en la cual se cargan los contenedores para realizar el trayecto entre el muelle y el patio (Monfort Mulinas et al., 2012). Una característica relevante de estos vehículos es que, por lo general, no son vehículos autónomos, sino que las órdenes se realizan de forma centralizada, aunque como se verá posteriormente, la técnica ha avanzado lo suficiente como para permitir modalidades diferentes.



Figura 19. AGVs en la CTA de Hamburgo. Fuente: (Konecranes, n.d.)

Uno de los elementos clave en este tipo de vehículo, son los sistemas de guiado, realizándose a través de un sistema de transpondedores que se encuentran



enterrados a unos 20 cm de la superficie del pavimento de la terminal, llevando los AGVs un sistema de sensores que junto a los transpondedores determinan la posición exacta en la cual este se encuentra (Monfort Mulinas et al., 2012). Además, para evitar choques, se dispone de varios sistemas de detección de obstáculos, tales como láser, ultrasonidos, y como último recurso, un parachoques flexible, que detiene el vehículo en cuanto sufre alguna deformación (Monfort Mulinas et al., 2012). Todos estos sistemas tienen la ventaja frente a condiciones climáticas adversas, donde se reduzca la visibilidad, ya que, si se empleasen otros sistemas, por ejemplo, visión artificial, no se podría trabajar. Además, se tiene la ventaja de no ser necesario iluminación nocturna, con el consiguiente ahorro energético y eliminación de la contaminación lumínica.

Los AGVs tienen unas velocidades máximas características de entre 6 y 7 m/s, dependiendo del fabricante, siendo en giros de 2,5 m/s. El hecho de que tenga ambos ejes con posibilidad de giro, le permite aumentar su maniobrabilidad, reduciendo así los radios de giro.

En cuanto a la propulsión de estos vehículos, pueden ser diésel, como fueron los primeros modelos, diésel-eléctricos o eléctricos, siendo esta última la elección más común en las terminales más modernas.

En cuanto al tipo de baterías de los AGV eléctricos -siendo extensible también a los L-AGVs-, pueden ser baterías de plomo y ácido, que se remplazan de manera automática en 5 minutos, o baterías de ion-litio, que tienen un menor peso, tres veces más ciclos de carga que las de plomo y ácido y una carga más rápida que las primeras (Konecranes, n.d.). El hecho de que la flota de AGVs sea eléctrica, puede acarrear reducciones de costes de hasta un 14% (Schmidt et al., 2015).

Uno de los problemas que tienen los AGVs es que necesitan una infraestructura completamente adaptada, tal y como se ha hecho mención anteriormente, además de que no se tiene en cuenta la gestión de fallos, es decir, cuando un vehículo falla, bloquea el camino de los vehículos que van detrás (Hamdi et al., 2012).

El layout, o diseño de la zona de AGVs, referido a las posibles rutas que estos pueden seguir, puede ser de carriles múltiples, bucle o una combinación de ambas (Vis and Harika, 2004). El camino tipo bucle tiene el inconveniente de que una vez completada la tarea, tiene que realizar todo el camino por un circuito exterior hasta la siguiente, no optimizándose las rutas. También cabe mencionar un problema que se tiene independientemente del diseño del layout, que es el



gran desgaste que sufre el pavimento portuario por el paso de los AGVs siempre por los mismos puntos, problema compartido con otros tipos de vehículos automatizados, como el L-AGV, ALV, etc.

Una de las características que tienen los AGVs en su aplicación a terminales portuarias, es que, al estar basadas en bloque, pueden describirse como un camino de topología de camino de malla. A la hora de optimizar estas rutas, se prioriza la no existencia de conflictos, antes que los caminos óptimos (Małopolski, 2018).

Otro aspecto, que pese a estar poco estudiado respecto a otros, es el mantenimiento de los AGVs. El mantenimiento de un AGV como un ente aislado puede ser más fácil de estudiar, pero la complejidad radica en estudiar un sistema de múltiples AGVs. Para poder llevar a cabo este estudio se emplean redes de Petri, analizando tanto el mantenimiento correctivo y predictivo. Se llega a la conclusión, a partir de simulaciones, que, sin ningún mantenimiento, en 12 meses el 98% de AGVs no estarán disponibles, que el intervalo de mantenimiento óptimo se encuentra en 20 días, y que el mantenimiento correctivo aumenta el desempeño del sistema, aunque tiene asociados unos mayores costes de mano de obra (Yan et al., 2018).

4.3.2 Lift-AGV

El funcionamiento de los L-AGVs es prácticamente igual al de un AGV convencional, con la gran particularidad que tiene el primero en operaciones de carga o descarga de contenedores, ya que dispone de dos plataformas de 20 pies que puede elevar para realizar estas operaciones y dejar el contenedor o contenedores en unas guías situadas en buffer de los bloques de almacenamiento o en las grúas de muelle.

Esto permite desacoplar los movimientos, con las ventajas de reducción de tiempos de espera que se tienen tanto en almacenamiento, interconexión y puerta marítima. En definitiva, este vehículo conserva los elementos esenciales del AGV convencional, añadiendo la principal ventaja que tienen los ALVs.

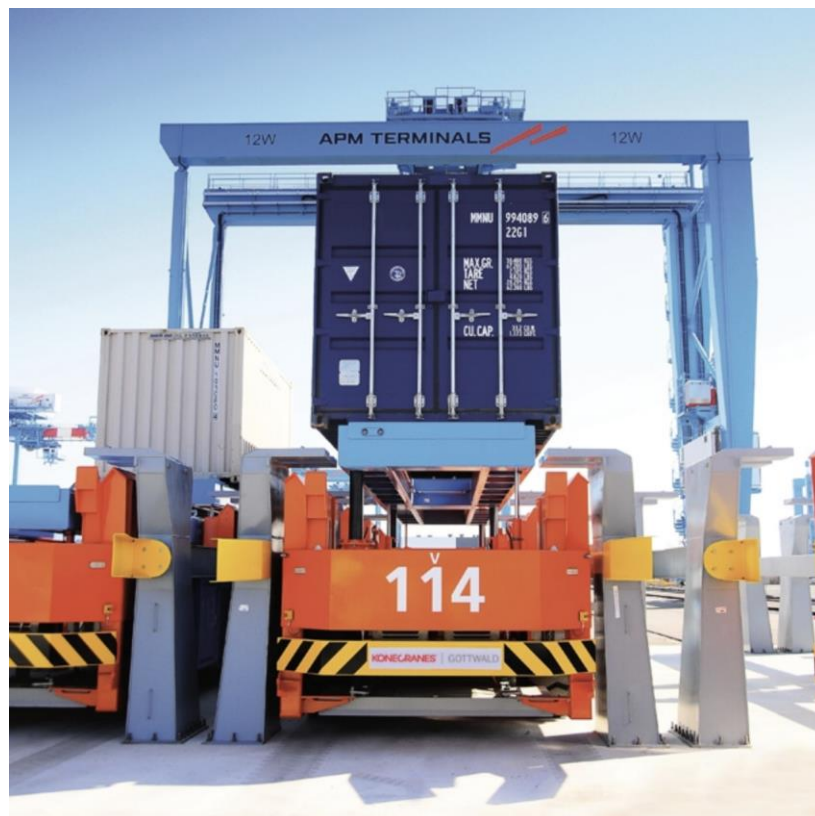


Figura 20. Vista de un L-AGV con la plataforma elevada al lado de las guías. Fuente: (Konecranes, n.d.)

4.3.3 Cassette-AGV

Los Cassette-AGV o C-AGV, son un tipo de vehículo autónomo de interconexión, cuyas principales diferencias con el resto de vehículos es que puede moverse en cualquier dirección y girar 360° gracias a la rotación completa de sus ejes, además de tener una capacidad de carga muy superior, ya que pueden transportar apilados hasta dos contenedores de 40 pies (TTS Marine, n.d.).



Figura 21. Concepto de C-AGV. Fuente: (TTS, n.d.)

Para realizar la carga o descarga de los contenedores es necesario disponer de unas guías especiales llamadas Cassettes, estando, por tanto, desacoplados los movimientos (TTS Marine, n.d.). Además, en cuanto al aspecto energético, se ha desarrollado un sistema que permite el suministro energético desde el suelo al vehículo sin contacto alguno (TTS Marine, n.d.).

4.3.4 ALV

Los Automated Lifting Vehicles, tal y como se ha mencionado anteriormente, es un tipo de vehículo de interconexión automatizado, pero que puede servir como herramienta básica del subsistema de almacenamiento al mismo tiempo, siendo un Staddle Carrier automatizado. A nivel comercial, el más avanzado, y el único que se ha implantado ha sido el AutoStrad de Kalmar. Este vehículo se usa para interconexión en la terminal de TraPac Los Angeles, y como interconexión y almacenamiento en las terminales de AutoStrad Brisbane y AutoStrad Sydney.



Figura 22. Ejemplo de ALV. Fuente: (Kalmar, n.d.)

4.3.5 IAV

Los **Intelligent Autonomous Vehicle (IAV)**, surgen del proyecto europeo InTraDe, siendo una evolución de los AGVs. Las principales características de estos vehículos son las que se muestran a continuación (Kavakeb et al., 2015):

- Capacidad de recoger/descargar contenedores por sí mismos, si disponen de cassette, desacoplando movimientos.
- Flexibilidad de maniobrar en espacios reducidos, debido a que pueden mover las ruedas a 180°.
- Carencia de necesidad de seguir una vía fija, debido a la conexión del IAV y un simulador inteligente virtual en tiempo real.
- Detección de obstáculos alrededor del vehículo con una precisión de un centímetro gracias a un sistema de sensores incrustados.
- GPS acoplado con localización y mapeado simultáneo para la navegación.
- Cada IAV contiene 8 actuadores eléctricos y descentralizados, cuatro para la tracción y otros cuatro para el control del movimiento de las ruedas. Si un actuador falla, el IAV puede continuar su trabajo, cubriendo los demás actuadores al averiado.
- Pueden formar pelotones, siguiendo un IAV a otro, formando un tren. El vehículo que lidera este tren, suele ser un vehículo conducido por un humano.



Figura 23. Ejemplo de IAV. Fuente: (European Commission, 2015).

La toma de decisiones de este tipo de vehículos se realiza de la siguiente forma, primero, en base a algunas características nombradas anteriormente, se realiza



una representación de la escena, y posteriormente, esta situación se analiza, generando una lista de posibles acciones (Bahnes et al., 2016).

Uno de los posibles conflictos que se pueden generar son los bloqueos en intersecciones, esto se soluciona usando las comunicaciones **V2V (Vehicle to Vehicle)**, en base al protocolo **WAVE (Wireless Access in Vehicular Environments)**, habilitando así comunicaciones entre toda la flota de IAVs acerca de su estado (posición, dirección, velocidad), con un intervalo de comunicaciones de entre 100 ms y 1 segundo, mandando mensajes de posición frecuentemente, y en el caso de aproximarse a una intersección, comunicaciones de cooperación, para determinar qué vehículo tiene prioridad (Bahnes et al., 2016).

Para la programación de estos vehículos, se debe de minimizar el tiempo, el recorrido, pero especialmente el consumo energético para evitar fallos. Esto se puede resolver a través de un algoritmo genético (Zaghdoud et al., 2012).

En una comparación con los *truck terminal*, los IAVs, al tener una mayor maniobrabilidad, reducen la longitud de las rutas, además de poder desacoplar movimientos gracias a la recogida o descarga de contenedores por sí mismos (Kavakeb et al., 2015). En el mismo estudio se lleva a cabo una comparación con la herramienta de simulación FlexSim CT, a partir de los datos de movimientos de una terminal real con Truck Terminal. Se hacen dos comparaciones, en primer lugar, AIVs sin *cassettes*, es decir, IAVs que son incapaces de recoger y descargar contenedores por sí mismos, y posteriormente con *cassettes*, comparándose ambos con *truck terminal*. Cabe destacar, los datos de velocidades tomados en la dicha simulación, mostrados en la siguiente figura:

	Truck	IAV
Empty speed (m/s)	13.41	4
Loaded speed (m/s)	11.18	2
Acceleration (m/s ²)	1	0.5

Figura 24. Input de velocidades tomados para comparación entre IAVs y Truck Terminal. Fuente: (Kavakeb et al., 2015)

En la comparación de IAVs sin *cassettes*, el rendimiento operacional es muy similar a los camiones de terminal, siendo lastrados por su baja velocidad, pero obteniendo ventaja de su maniobrabilidad y acortamiento de rutas, siendo ambos factores clave para que ambos tengan un rendimiento similar (Kavakeb et al., 2015).



El uso de *cassettes* tiene un aumento en la operatividad, y en especial, permite la reducción del tamaño de la flota de vehículos. Considerando un coste de adquisición de 500.000 € más 10.000 euros por el *cassette* y la instalación para los IAVs, y de 123.000 € para los camiones de terminal, y considerando una simulación de coste generalizado en 15 años, los IAVs obtienen un mejor resultado económico, por la menor necesidad de flota y por los menores costes energéticos, ya que, estos vehículos son eléctricos.

Para el problema de asignación de IAVs, se usa un algoritmo genético (GA), realizando previamente una relajación lagrangiana, resolviéndose para la Dublin Ferryport Terminal, obteniéndose un mejor rendimiento que el sistema de camiones de terminal (Gelareh et al., 2013).

Se considera que los IAVs, son vehículos cuya mejor implantación puede darse en terminales pequeñas, con un tráfico creciente y que no tienen suficiente espacio para expandirse, ya que, aumenta el rendimiento del subsistema de interconexión, con una gran mejora de operación y costes respecto al sistema tradicional de camiones de terminal (Gelareh et al., 2013). En cuanto a la elección de la programación de los vehículos, se ha demostrado que, con estrategias de asignación dinámica de vehículos en terminales de tamaño pequeño-medio, la operativa de la terminal, se ve incrementada usando este tipo de *scheduling*, usando una programación de este tipo, además online, para que cambie en tiempo real (Kavakeb et al., 2015).

También se han estudiado los IAVs en relación con su componente estructural (Loureiro et al., 2012), y la supervisión en caso de fallo de alguno de sus componentes (Chatti et al., 2013).



4.4 Subsistema de recepción y entrega

Pese a que pueda parecer este un subsistema irrelevante en la automatización de una terminal de contenedores sucede todo lo contrario, debido a que la información sobre llegadas de contenedores puede realizarse de una forma más rápida y fiable, manteniendo el criterio de la automatización que es el reducir al máximo los costes laborales. Aunque el subsistema de recepción no es tan solo la forma en que se maneja la información sobre las llegadas o salidas de camiones y/o contenedores, sino también la forma en la cual se reciben o expiden estos últimos. Mientras que el primer aspecto puede ser común, tanto en terminales convencionales como automatizadas, el segundo aspecto solo ocurre en estas últimas.

Probablemente, la automatización de este subsistema, especialmente la recogida de información sea la más madura de todas, debido a que este subsistema no debe suponer un cuello de botella en la terminal, y además tiene que brindar un adecuado nivel de servicio a los usuarios (Monfort Mulinas et al., 2012).

Tal y como se ha comentado anteriormente, uno de los problemas a nivel de programación, especialmente en el almacenamiento, es la aleatoriedad de llegadas. Algunas terminales aplican un sistema de control de llegadas, llegando incluso a penalizar a los conductores que no respetan el mismo. Se está estudiando la aplicación de **IoT (Internet of Things)** para control de los vehículos externos en tiempo real y así tener una predicción exacta de las llegadas (MSC, 2018). Pese a que este avance es aplicable también a terminales convencionales, resulta de mayor relevancia su aplicación a terminales automatizadas.

La automatización se puede dar en la mejora o aplicación de los siguientes elementos (Monfort Mulinas et al., 2012):

- Identificación del conductor y el vehículo
- Identificación del contenedor
- Aplicación de sistemas ITS

En primer lugar, la identificación de contenedores y vehículos se puede realizar a través de sistemas **OCR (Optical Character Recognition)** o **RFID (Radio Frequency Identification)**, mientras que la identificación de conductores es posible llevarla a cabo con estos últimos sistemas o con sistemas de identificación biométrica.

En primer lugar, el OCR es un sistema que permite la lectura de texto y su transformación a formato digital, permitiendo la lectura de matrículas, tanto de camiones, como de contenedores, además del resto de identificadores de este último. Dado que es un sistema el cual se ha demostrado su robustez, es el más aplicado para la automatización de puertas y de la recogida de información en otros elementos de la terminal, como es en las grúas de muelle, donde se emplea para el registro y comprobación de los contenedores manejados.

Para su implantación en las puertas es necesario la colocación de unos pórticos con sensores láser y magnéticos, para la identificación de vehículos y poder realizar la captura de imagen a través de cámaras CCTV con sensores **CCD (Charge Coupled Device)**, además de iluminadores que permitan una correcta luminosidad para la captura de imágenes (Monfort Mulinas et al., 2012).

En segundo lugar, el RFID es un sistema de comunicación a través de radio frecuencias. Tal y como se puede observar en la siguiente figura el sistema se basa en una etiqueta (*tag*), que se comunica con el lector, y posteriormente con el Middleware que alberga la base de datos (Monfort Mulinas et al., 2012).

Existen varios tipos de tags, activas, que permiten comunicaciones de largo alcance, encriptación de información, además de poder tener posicionamiento por GPS, comunicación por satélite, entre otras, y las pasivas (Monfort Mulinas et al., 2012).

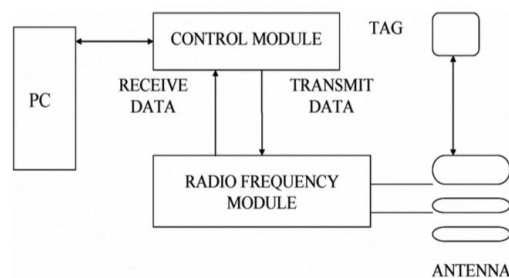


Figura 25. Arquitectura de un sistema básico RFID. Fuente: (Wei Wang and Shidong Fan, 2009).

Tal y como se ha mencionado anteriormente, los RFID pueden aplicarse tanto a los contenedores, camiones y conductores. En el primer caso, su aplicación es la identificación del contenedor en la puerta, y su comunicación al TOS, a través de unos pórticos expresamente instalados para esta función. En el caso de los camiones, puede haber dos funciones, una exactamente igual a la del contenedor, y una segunda que es dar permiso o no de entrada, función compartida con la aplicación a conductores que se identifican con una tarjeta y



se les da permiso para su entrada en las instalaciones portuarias (Monfort Mulinas et al., 2012).

Los mayores inconvenientes del RFID son, en primer lugar, la falta de un estándar, ya que los diferentes estándares usados en diferentes áreas (EPC en Europa y América, y UID en Japón), son incompatibles entre ellos, con lo cual, si se quiere aplicar este sistema a la industria del transporte marítimo se debería de adoptar un estándar (Wei Wang and Shidong Fan, 2009) (Monfort Mulinas et al., 2012). Por otro lado, a los inconvenientes del RFID se une su elevado precio, ya que para cada contenedor serían necesarios unos 200 euros (Wei Wang and Shidong Fan, 2009), cifra que puede resultar inviable.

En cuanto a la recepción y entrega física de contenedor, hay varias combinaciones posibles (aunque no se recogen estrictamente todas):

- Automatizada con bloques perpendiculares al muelle
- Semiautomatizadas con bloques perpendiculares al muelle
- Semiautomatizadas con bloques paralelos al muelle
- Automatizadas con bloques paralelos al muelle

Los dos primeros casos -bloques perpendiculares al muelle- se tratan de una forma similar en todas las terminales, siendo lo más común tener 4 o 5 espacios para posicionamiento de camiones en un extremo del bloque de almacenamiento, habiendo algunas excepciones como sucede en la TTI de Algeciras donde se realiza una interconexión con Staddle Carriers entre los bloques de almacenamiento y los camiones terrestres.

El tercer caso suele ser tratado al igual que una terminal convencional, o mezclando flujos internos y externos, o bien realizando un punto de intercambio de forma que dentro de la terminal solo circulen los camiones o vehículos de interconexión de la misma.

Una cuestión que se debe plantear en cuanto a la recepción o expedición física de los contenedores es la situación que puede ocurrir en terminales automatizadas con bloques paralelos al muelle. Esta configuración hace que no sea posible el acceso a los mismos desde un punto que haya segregación de tráfico internos y externos. Para resolverlo se deben de tener en cuenta factores tales como el volumen de tráfico import/export, espacio disponible para la puerta y picos de llegadas o salidas.

Se pueden plantear varias soluciones. La primera de ellas es usar ALVs como elemento de interconexión, ya que de esta forma se pueden depositar o recoger los contenedores de los camiones externos directamente. Si se usan otros tipos de vehículos de interconexión automatizados, se debe ir a otro tipo de soluciones, tales como usar los bloques más próximos a la puerta como elemento de conexión a los vehículos internos de la terminal o realizar un buffer externo y que la interconexión entre los vehículos internos y externos se haga con Staddle Carriers convencionales, considerando a estas últimas opciones como muy ineficientes.

En la única terminal de este tipo en funcionamiento en Nagoya, se disponen unos carriles especiales para que puedan entrar los camiones externos. Estos tienen una barrera, que se abre cuando no hay riesgo de interferencia con los AGV.



Figura 26. Ejemplo de segregación de tráfico externo en Tobishima Container Berth (Nagoya). Fuente: Google Earth.

En cuanto al proceso de llegada a una terminal completamente automatizada tipo, con bloques perpendiculares al muelle, se debe comprobar la matrícula del camión a través del sistema OCR, además de la identidad del conductor debiendo de pasar una tarjeta RFID, junto a datos biométricos (huella dactilar) antes de levantar la barrera. Posteriormente se pasa por unos pórticos OCR donde se leen los datos del contenedor y queda registrado el estado de este. Seguidamente se pasa por un arco donde se vuelve a pasar la tarjeta RFID y se hace entrega un papel indicando el lugar donde debe ir el camión. Una vez posicionado el camión en el punto de transferencia, el camionero debe de liberar los twist-locks, pasar la tarjeta y mantener pulsado un botón en una máquina situada a unos metros delante de la cabeza tractora del camión (Camco, n.d.).

Por otro lado, este subsistema también comprende la llegada o salida de contenedores a través de medios ferroviarios se suele usar pórticos OCR instalados en las vías.



4.6 Infoestructura y TICs

Este apartado hace referencia a todos los flujos de información que tienen lugar en las terminales de contenedores automatizadas, así como los sistemas e infraestructura necesaria para su funcionamiento, así como cuál puede ser su evolución en el futuro.

Los flujos de información son esenciales para el correcto funcionamiento de una terminal, tanto automatizada como convencional, y especialmente en el primer tipo. Como se ha visto en el apartado 3.4, en una terminal se generan unos flujos de información procedentes de la identificación de los contenedores, pero a ello hay que sumarle la información documental en formato electrónico, y en una terminal automatizada todos aquellos aspectos que dependen del TOS y que son necesarios para el funcionamiento automatizado de los distintos subsistemas.

A la hora de la implantación de un sistema de comunicaciones inalámbrico especialmente destinada para los vehículos automatizados de interconexión surgen una serie de retos, tales como el ambiente salino de la terminal, grandes cambios de temperatura o el propio movimiento de los vehículos. Además, esta red debe evitar interferencias con las otras redes que pueda haber en la terminal, construidas específicamente para esta. Se debe procurar que los puntos de acceso inalámbricos cubran toda la zona de automatización, además de tener redundancia en caso de fallo (Siemens, 2015). En el caso específico de los AGVs, estos radian hacia los transpondedores enterrados en el pavimento, comunicando de esta forma sus coordenadas, que son necesarias “para su orientación y corrección de la ruta”, no para navegación (Siemens, 2015). En lugar de transpondedores se pueden usar tags RFID (Yang et al., 2018).

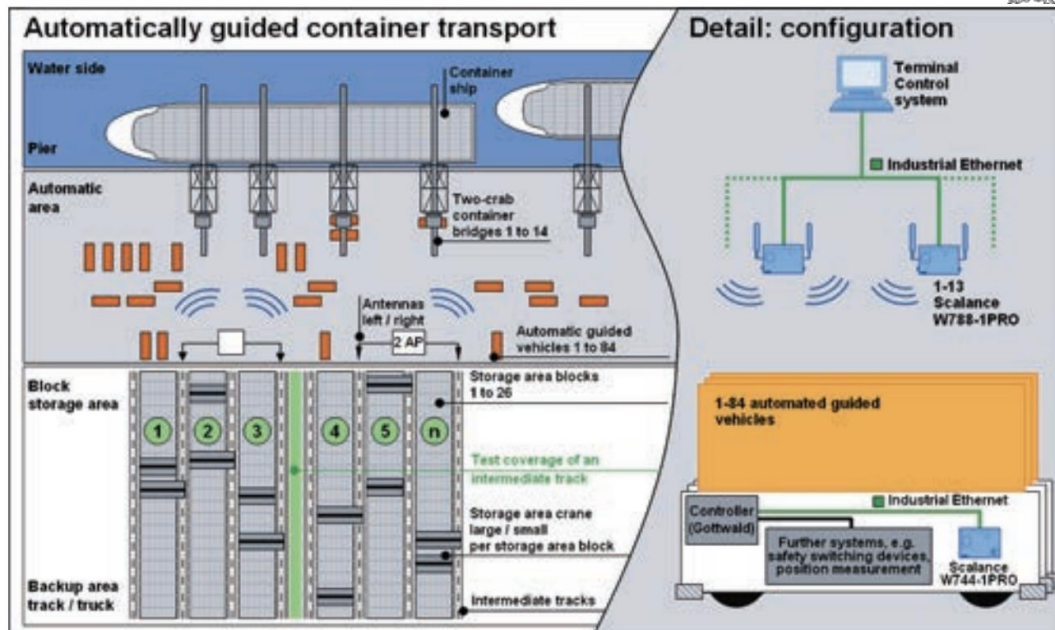


Figura 27. Ejemplo de comunicaciones inalámbricas en la CTA de Hamburgo. Fuente: (Siemens, 2015).

Uno de los aspectos más importantes que deben incluir los sistemas de control de la terminal es la seguridad frente a colisiones, creando zonas restringidas alrededor de los vehículos de interconexión, además de parar las máquinas necesarias (ASCs, AGVs, etc.), en caso de detección de un humano. Cabe mencionar que, en caso de pérdida de comunicación con algún elemento de la terminal, el sistema debe tener un *Fail Safe* y detener todos los vehículos.

En el caso de otros subsistemas como carga y descarga o almacenamiento, los sistemas de comunicaciones tienen una implantación más sencilla, debido a que si se usa alimentación eléctrica se puede emplear el sistema de enrollamiento de cable y tener integradas fibra óptica, suministro eléctrico y otras comunicaciones en el caso que fuesen necesarias. Esto hace que se tengan unas comunicaciones con un gran ancho de banda y con una latencia baja en la terminal. Es importante resaltar que independientemente que la conexión sea inalámbrica o no, va a estar sustentada por fibra óptica para la comunicación con el TOS.

El elemento más importante a nivel de TICs es el TOS, ya que, como se ha visto anteriormente es el encargado de integrar todos los elementos de control, comunicaciones y órdenes a toda la maquinaria y sistemas que componen la terminal, además de ejecutar la programación, optimización y asignación de tareas.

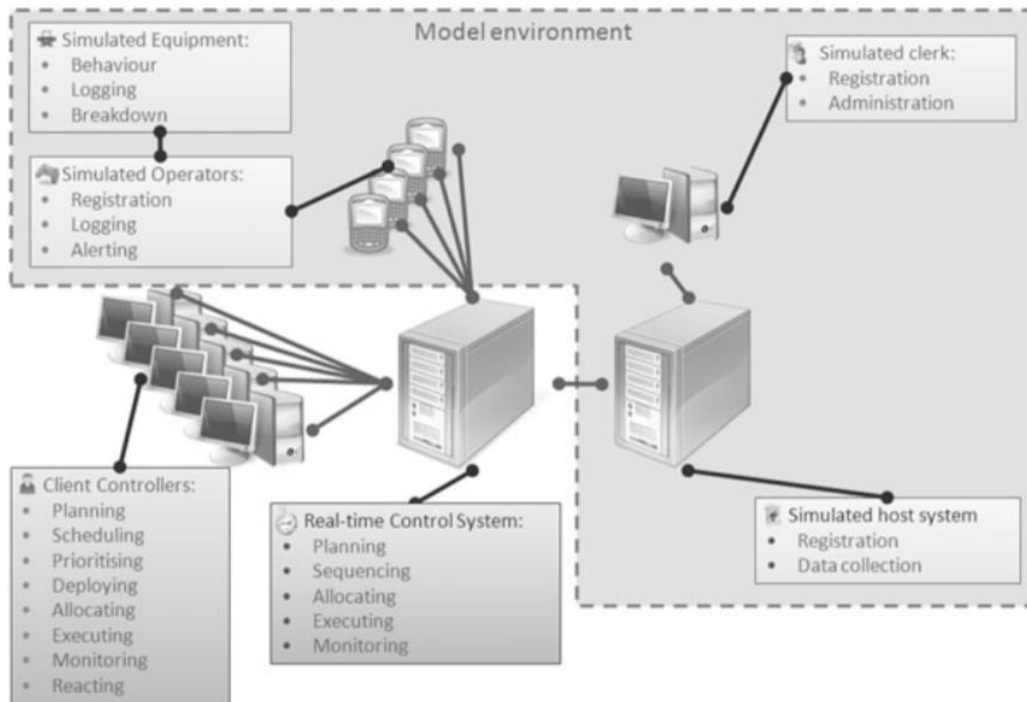


Figura 28. Ejemplo de arquitectura del TOS. Fuente: (Böse, 2011).

El futuro de las comunicaciones pasa por la implantación y desarrollo de aplicaciones 5G, teniendo también aplicación al ámbito de las terminales portuarias de contenedores, tanto automatizadas como convencionales, pero es en las primeras, donde se manejan una cantidad mayor de datos y flujos de información, donde puede tener mayores aplicaciones, y aprovechar las mismas para conseguir un mayor rendimiento operacional. También permite tener una mayor calidad de servicio y seguridad de la red gracias al *slicing*, dedicando un canal específico a la terminal o al puerto (Hinkka et al., 2018) (Rost et al., 2018).

Por ejemplo, hay varios proyectos que están estudiando la aplicación del 5G para su aplicación portuaria. Se debe destacar su aplicación a maquinaria portuaria, vehículos automatizados y mejora del tráfico externo (Michalopoulos et al., 2018).

También es aplicable la tecnología 5G al mantenimiento, debido a la complejidad de la maquinaria portuaria y de la necesidad de que esta esté al 100%, habilitando en muchos casos una comunicación en tiempo real con el fabricante o experto, gracias a latencias de 1 ms, incluso pudiendo hacer uso de **VR/AR (Virtual Reality/Aumented Reality)**.



También la aplicación del 5G, junto al concepto asociado de computación en el borde (*edge computing*), pueden suponer un avance muy importante en el ámbito de las terminales de contenedores automatizadas (Hinkka et al., 2018). Tal y como se ha mencionado en el apartado 3.3.1 relativo a AGVs, respecto a la toma de decisiones se tenía la opción de realizarla centralizada, basándose únicamente en el TOS, o distribuida, de forma que cada vehículo o máquina tenga la capacidad de poder tomar decisiones y realizar las computaciones oportunas, cosa que hoy en día es difícil, pero que puede ser una realidad en unos años gracias al 5G y la habilitación de comunicaciones **M2M (*Machine to Machine*)**, pudiéndose aprovechar la inteligencia artificial y *machine learning* para elaborar programaciones y asignaciones dinámicas.

Otras tecnologías que pueden tener aplicación para la mejora del rendimiento son los ERPs, pudiendo integrar de una forma sencilla, mediante la aplicación de un software comercial (por ejemplo, SAP TM), a toda la comunidad portuaria, y los flujos de información generados por ésta, sin que sea necesario el desarrollo de un software propio (Hinkka et al., 2018), aunque también resulta relevante la joint venture de IBM y Maersk respecto a la aplicación del Blockchain a la cadena logística. El uso del Blockchain tiene las mismas ventajas que la creación de un **Port Community System (PCS)**, pero con una mayor seguridad, y siendo auditada por las compañías de seguros. Por último, también se puede aplicar GIS para visualizar la asignación de recursos y poder detectar disfuncionalidades del sistema (Hinkka et al., 2018)¹.

¹ Los tres conceptos expuestos (ERPs, PCS y Blockchain) tienen como objetivo la unificación de los flujos de información, aunque difieren de la escala y del tratamiento de la documentación. En primer lugar, los ERP pueden ser aplicados a una comunidad portuaria o tener un ámbito mayor, dependiendo de las políticas adoptadas. Se manejan los flujos físicos, pero no los flujos de documentación anexa al transporte.

Los PCS, a diferencia de los ERP (que son sistemas modulares bajo licencia comercial) son sistemas propios desarrollados expresamente para una comunidad portuaria y que manejan tanto flujos físicos, como documental.

Por último, el Blockchain es una hibridación en cierto modo entre los anteriores, ya que permite unificar los flujos físicos y documentación de toda la cadena logística.



Capítulo 5. Estado del arte en el ámbito académico de la automatización de los diferentes subsistemas y elementos de una TPC.

En el presente capítulo se va a realizar una revisión de los artículos académicos que resuelvan algún problema en el ámbito de las terminales de contenedores automatizadas.

Para facilitar la organización del epígrafe, se va a desgranar en primer lugar por subsistemas – en caso de que solo esté compuesto por un elemento, siendo el de carga y descarga el único donde sucede esto -, o por elementos (AGVs, ARMGs, etc.). Posteriormente, se entrará en detalle de los problemas posibles de cada uno de ellos.

5.1 Estudios realizados en el subsistema de carga y descarga

Tradicionalmente en este subsistema se han estudiado los problemas de asignación, de grúas a buques, en el espacio y en el tiempo (manos y turnos), en función de la actividad revista a realizar, y los tiempos estimados de llegada al atraque (*allocation/assignment*) y de programación (*scheduling*). La problemática radica en que estos estudios, que sí se han llevado a cabo en este subsistema para terminales convencionales, no se ha resultado ninguno considerando la automatización del subsistema, como elemento aislado.

Lo que sí se ha hecho, como se verá más adelante, es la integración de este subsistema en problemas de optimización conjunta en terminales de contenedores automatizadas.

5.2 Estudios realizados sobre ARMGs

5.2.1 Políticas de apilado (*stacking*) y asignación (*assignment*)

En primer lugar, los problemas relativos a las políticas de apilado son aquellos que resuelven qué reglas de operación básicas respecto al apilado en el subsistema de almacenamiento son las más adecuadas.

Este problema constituye la base de los problemas de asignación de grúas, debido a que la asignación de tareas debe realizarse teniendo en cuenta las políticas de apilado.



Respecto a los ARMGs, se debe considerar que al ser la altura de apilado mayor que con otros sistemas, también la tasa de productividad neta disminuye al tener un mayor número de movimientos (Monfort Mulinas et al., 2012). Para reducir estos movimientos parasitarios, se emplea la estrategia llamada “*Maximum Remaining Stacking Capacity*”, descrita por Duinkerken, Evers y Ottjes (Duinkerken et al., 2001). Esta regla o política de apilado consiste en que un contenedor se dispondrá encima de otro que esté asignado a la misma grúa de muelle y que tenga una “categoría mayor o igual” (Duinkerken et al., 2001). Si no hubiese ningún espacio disponible que cumpliera esta condición, el contenedor se apilaría en una posición en el cual los movimientos parasitarios fuesen mínimos. Cabe mencionar que esta política de apilado necesita un input de información muy importante.

También se ha desarrollado una variación de este método. En lugar de minimizar los movimientos parasitarios, si no existiese ningún espacio con una categoría mayor o igual, se empezaría a apilar en un espacio vacío. En el mismo estudio también se realizó una simulación numérica (Hamdi et al., 2012), aunque hubiese sido muy interesante incluir en ese apartado una comparativa entre distintas políticas de apilado, así como la aplicación de estas a distintas alturas máximas de apilado.

Más en concreto, y relativo a DRMG, a la hora de optimizar y asignar estos sistemas, los operadores de las terminales “prefieren evitar cualquier tipo de complejidad en la coordinación y asignación [...] por razones de seguridad y simplicidad, aunque una asignación más compleja diese lugar a ahorros de tiempo” (Gharehgozli et al., 2017). También, en este tipo de planteamientos, se debe tener en cuenta la naturaleza propia de la operatividad de la terminal (volumen de tráfico, etc.) ya que esta puede ser cambiante en el tiempo, teniendo implicaciones en el subsistema de almacenamiento, y afectando a la política de apilado. Para ello, en lugar de la política tradicional estática y no adaptativa, hay propuestas de políticas de apilado (*stacking*) que tenga en cuenta los cambios que se produzcan, usando algoritmos online, siendo esta ajustada cada día, siendo esta propuesta muy adecuada para minimizar las demoras en las grúas de muelle, y en general, aumentar la productividad de la terminal en base a reducir los tiempos de espera de AGVs, grúas de muelle y camiones externos (Park et al., 2011). Ello se realiza a través de un análisis multicriterio, donde la dificultad radica en determinar el peso dado a cada variable. Lo óptimo para ello sería buscar sistemáticamente un vector de pesos óptimos a través de un algoritmo offline, aunque esto es “computacionalmente inviable para una terminal de contenedores de un tamaño realista” (Park et al., 2011).



Otro aspecto muy importante en la operativa diaria de una terminal son los movimientos de recolocación de contenedores, es decir, los movimientos parasitarios anteriormente comentados. Estos últimos deben de realizarse de noche, mientras que los procesos de sacar los contenedores del bloque deben realizarse durante el día. Además, en el mismo estudio se determina que para una mejor eficiencia en el proceso de salida de los contenedores del bloque se debe de optimizar los procesos de entrada. Todo ello se determina con un **modelo de asignación de espacio segregado y de periodo múltiple** (*Multiple-period segregation space allocation model*) (Yu and Qi, 2013).

5.2.2 Scheduling

Como ya es sabido, los problemas de programación (o *scheduling*), tienen como objetivo resolver unas determinadas tareas asignadas. Pero esta resolución, como resulta obvio debe de responder a unos ciertos condicionantes de recursos, o reglas.

En primer lugar, el tener un mayor número de grúas por bloque puede aumentar la eficiencia de la terminal, debido a que pueden aumentarse el número máximo de movimientos por bloque, y así reducir los tiempos de espera de los AGVs, pero ello no está exento de problemas, tales como colisiones o conflictos en la asignación entre ASCs. De ello surge la necesidad de resolver el problema de asignación de múltiples ASCs en un mismo bloque, ha habido propuestas para la resolución de dicha cuestión, tales como trasladar el problema hacia un problema Job shop y resolviéndolo con teoría de grafos, minimizando el tiempo de espera de los AGV y priorizando el lado de la puerta marítima (Lu and Wang, 2019).

En el caso de un bloque con dos o más grúas no pasantes, se puede destinar un espacio en la mitad del bloque, llamado "*handshake*", para que la grúa que ha recogido el contenedor en uno de los espacios de entrada/salida (muelle o tierra), pueda dejarlo en este espacio para que la grúa contraria pueda completar el viaje al otro punto de entrada/salida. Este espacio de seguridad debe de ser de, al menos, un TEU o slot.

También se puede contemplar la posibilidad de tener más de una zona de intercambio, con el objetivo de minimizar tiempos de trayecto, y en general, maximizar la eficiencia. Con una sola zona de intercambio, se tiene la ventaja de que la ruptura de requerimientos es menor, pero, por el contrario, se tendrá una mayor probabilidad de interferencia. En cambio, si se tienen dos zonas de *handshake*, se tendrá la situación contraria a lo anterior (Gharehgozli et al.,



2017). En problemas de **programación (*scheduling*)** es importante tener en cuenta las interferencias, ya que se puede aumentar mucho la productividad si se usa un algoritmo de ramificación y poda, siendo esta mejora en los casos de DRMG de un 39% (Speer and Fischer, 2017).

En el caso de que no se realice un “*handshake*” en cada bloque, en un bloque con dos ASCs no pasantes, se debe de resolver el problema de asignación y programación, incluyendo “cómo asignar una lista de requerimientos a ambos ASCs, cómo dividir las peticiones entre los ASCs y cómo realizar la programación de peticiones para cada ASC” (Carlo and Martínez-Acevedo, 2015). Para obtener la prioridad óptima, se puede usar un **algoritmo de ramificación y poda (*Branch & Bound algorithm*)**, aunque también cabe la posibilidad de realizar una lista de priorización, esta última posibilidad no da soluciones óptimas, pero por el contrario tiene una ventaja a nivel de computación (Carlo and Martínez-Acevedo, 2015). El uso de algoritmos de ramificación y poda en problemas de programación tiene como resultado un aumento de productividad en el bloque del 18%, con una reducción de retrasos del 50%, aunque los tiempos de computación en algunos casos son tan grandes que se hace imposible su aplicación real (Speer and Fischer, 2017). Una alternativa es el uso de estos algoritmos, y cuando haya transcurrido un cierto tiempo, se use la solución óptima alcanzada hasta ese momento (Speer and Fischer, 2017).

Realizando una simulación numérica, se determina que el mejor rendimiento se alcanza con dos zonas de *handshake* y con una estrategia de almacenamiento que coloque los contenedores cerca de los puntos de entrada y salida (Gharehgozli et al., 2017). Pese a ello, se obtienen unos resultados ligeramente mejores en los casos donde no existe zona de *handshake* (Gharehgozli et al., 2017). Otros criterios de diseño, tales como localización o programación de grúas, son variables, ya que depende de la heurística empleada para la resolución del problema (Gharehgozli et al., 2017).

Debido a la incertidumbre y aleatoriedad de las llegadas de los camiones a la terminal, sumando además una menor incertidumbre de la llegada de los AGVs – que puede ser paliada haciendo una optimización y programación conjunta – se tiene que “el problema de programación de RMGs es incierto y dinámico”, teniéndose la problemática de si hay algún cambio, como una tarea añadida, retraso en la llegada de un AGV, el problema debe de ser recalculado para volver a optimizar el problema (Park et al., 2010). Para ajustarse a estos requerimientos, es necesario tener un cálculo en tiempo real, “no siendo posible usar métodos exactos”, tales como **MIP (*Mixed Integer Programming*)**. Se puede emplear un algoritmo de búsqueda local, teniendo un horizonte de

búsqueda, que debe ser corto por dos motivos, el primero de ellos, debido a la incertidumbre operacional comentada anteriormente, y la segunda, para poder reducir los tiempos de computación. Cada vez que un RMG finaliza una tarea, se vuelve a dar una nueva programación (Schedule) para el horizonte dado. Debido a la cooperación entre las dos grúas, especialmente en recolocaciones de contenedores – acciones tratadas como acciones independientes -, se aumenta la utilización de las grúas, aumentando la eficiencia, y reduciendo los tiempos de espera de los AGVs y de los camiones de calle. En definitiva, este algoritmo de búsqueda local logra mejores resultados que las heurísticas de despacho de grúas (Heuristic-based Dispatching Crane) (Park et al., 2010).

También es relevante considerar el tiempo de ciclo de operación del ARMG, ya que su minimización puede llevar a mejoras de eficiencia y ahorro energético (Speer and Fischer, 2017).

También los problemas de programación (scheduling) de **TRMG (Triple cross-over Rail Mounted Gantry crane)** ha sido objeto de estudio en la literatura académica. Este tipo de sistemas se caracteriza por tener tres grúas en un mismo bloque, con dos grúas idénticas y otro pórtico de medidas superiores a estas y que las cruza.

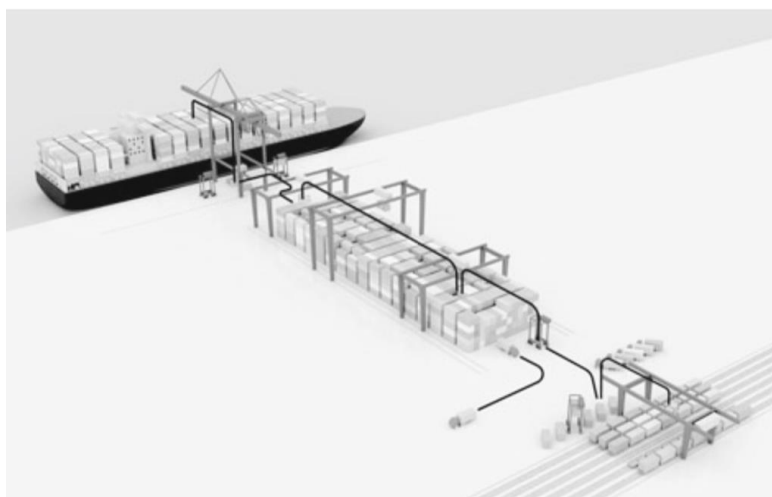


Figura 29. Concepto de TRMG. Fuente: (Dorndorf and Schneider, 2010)

En estos sistemas hay tres posibles conflictos o interferencias, la primera de ellas es entre las grúas del mismo tamaño, problema comentado anteriormente, seguidamente se tienen dos interferencias causados entre la grúa de mayor tamaño y las otras dos, ya que al bajar el spreader se puede dar lugar a conflictos, y además si se produce un cruce con alguna grúa, y la de mayores dimensiones está transportando un contenedor, debe mover el spreader al extremo donde se encuentre el carril de servicio (Dorndorf and Schneider, 2010).



Estos conflictos o interferencias son indeseables debido a que pueden dar lugar a esperas o movimientos innecesarios. Para asignación de tareas, se emplea la asignación de aquella que resulte más urgente o de aquella más próxima (*nearest neighbour*). Usando una heurística para resolver estas interferencias, junto a la aplicación de las reglas anteriores, la productividad neta por bloque se ve aumentada en un 21,2%. En el lado de muelle, este aumento de la productividad es ligeramente superior, pudiendo superarse el 30% (Dorndorf and Schneider, 2010).

En un estudio posterior que trata de optimizar la programación de TRMG, se parte también desde la base de evitar interferencias o conflictos, comparando un MIP junto a un **algoritmo voraz (*Greedy Algorithm*)** y un modelo gráfico. En la simulación realizada se obtienen los mejores resultados por parte del MIP, obteniendo una programación muy cerca del óptimo en un corto periodo de tiempo (0,2 segundos), mientras que el modelo gráfico no puede garantizar soluciones óptimas (Briskorn and Zey, 2018).

5.3 Estudios realizados sobre ARTGs

5.3.1 Políticas de apilado (*stacking*) y asignación (*assignment*)

No se ha realizado ningún estudio sobre ARTGs en estas materias, aunque sí que es cierto, que en cierta medida las políticas de apilado estudiadas en ARMGs, pueden tener una aplicación directa en ciertos casos, y con algunos matices en otros.

5.3.2 Scheduling

No se ha encontrado ningún artículo académico que resuelva algún problema de scheduling con ARTGs.

5.4 Estudios realizados sobre OHBC

5.4.1 Políticas de apilado (*stacking*) y asignación (*assignment*)

Sobre este elemento del subsistema de almacenamiento no se ha llevado a cabo estudio alguno relativo a estos dos campos.



5.4.2 Scheduling

No se ha encontrado ningún artículo que tratara los problemas de *scheduling* en el OHBC.

5.5 Estudios realizados sobre AGVs

Los estudios realizados respecto a los AGV en terminales de contenedores han variado fuertemente durante los inicios de estos a finales de la última década del siglo pasado, hasta mediados de la década pasada, periodo donde se estudiaba principalmente problemas de *dispatching* (Vis, 2006) (Grunow et al., 2004) (Bish et al., 2005) (Kim and Bae, 2004) y rutas de vehículos (Lochana Moorthy et al., 2003) (Koo et al., 2004). A partir de mediados de la década pasada, se abandonó, en cierta medida, el interés por estos vehículos, centrándose los estudios en asignación y computación, por un lado, estudios que están suscitando mucho interés en los últimos años. Cabe mencionar, que el foco de estudio de los AGVs, está en la industria convencional, habiendo cada vez menos estudios recientes sobre su aplicación a terminales de contenedores.

Por otro lado, son relevantes los problemas de programación (*scheduling*), aunque hay una tendencia, bastante acertada, que es no estudiar la programación de los AGV (u otro vehículo) de forma aislada, sino conjuntamente con otros subsistemas, habiéndose encontrado únicamente un par de estudios de forma aislada que se mostrarán en uno de los subapartados siguientes.

A continuación, se realiza una explicación de los diferentes problemas posibles ya no solo en este elemento, sino en general, aplicable a todos los vehículos de interconexión.

En primer lugar, los problemas de *dispatching* consisten básicamente en asignación de tareas a la flota existente, normalmente considerando un entorno dinámico. Seguidamente, los problemas de rutas de vehículos se centran en conseguir caminos óptimos, normalmente con ciertas restricciones como prevención de choques y basándose en una asignación de tareas determinada. Por último, los problemas de *scheduling*, es aplicable lo dispuesto en el apartado 5.2.2.

5.5.1 Toma de decisiones y asignación

Los problemas relativos a toma de decisiones son problemas de tipo computacional, que examinan cómo se debe de realizar las distintas órdenes a la flota de vehículos de la terminal.



La toma de decisiones en las flotas de AGVs, puede ser distribuida o centralizada, siendo preferible esta última en base a la experiencia de su implantación real (Bahnes et al., 2016).

También ha habido estudios de triple descomposición de despacho de vehículos y asignación de almacenamiento, aplicables a ALVs y AGVs, y tratando de hacerlo, además, en tiempo real (Hu et al., 2019).

Esta asignación o computación que dirige a los AGVs en tiempo real puede dividirse en dos grupos: heurísticas simples o basadas en planes óptimos. Las heurísticas simples “son ventajosas en aplicaciones en tiempo real porque no requieren mucha computación, pero su efectividad es limitada por la estrechez y la naturaleza cortoplacista de sus decisiones” (Choe et al., 2016). Ejemplo de esta asignación en tiempo real es la propuesta por Choe et al., proponiendo un algoritmo de aprendizaje de preferencias online, que se adapte a los cambios en el entorno y remplace los ejemplos con los que se ha entrenado al algoritmo con nuevos (Choe et al., 2016).

También ha habido otras propuestas de asignación de AGVs, desarrollando algoritmos que tuviesen en cuenta la incertidumbre asociada a sucesos inesperados, añadiendo esto a través de intervalos. Este algoritmo creado se comparó con otros tipos de heurísticas, obteniendo los mejores resultados, aunque teniendo un tiempo de computación superior al resto (Angeloudis and Bell, 2010).

5.5.2 Scheduling

En cuanto a la programación de los AGVs, ha habido estudios los cuales modelizaban el problema tratando de conseguir el mínimo coste, y otros los cuales se trataba de minimizar aspectos como tiempo de espera, tiempos totales de la tarea, entre otros. Un ejemplo del primero fue el estudio llevado a cabo por Rashidi y Tsang, en el cual se modelizaba la terminal como una serie de arcos y nodos, tratando de minimizar el coste de los flujos de los AGVs, comparando una variante del **Network Simplex Algorithm (NSA)**, llamado NSA+, el cual es un algoritmo completo, pero con dificultades para resolver problemas muy grandes. Para solventar esto último, se implementa una búsqueda voraz de vehículo (*Greedy Vehicle Search*). Se obtiene que el NSA+ es más eficiente para minimizar los tiempos de espera y de trayecto, mientras el GVS lo es para hacer mínimo el retraso medio, siendo recomendable en situaciones de programación



(*scheduling*) dinámica, consiguiendo ambos unos resultados óptimos, pudiéndose aplicar en situaciones reales (Rashidi and Tsang, 2011).

En otro estudio, se realiza una descomposición entre la asignación, resuelto a través de un **algoritmo genético (GA)** y la ruta óptima, usando el algoritmo de Dijkstra, dando este enfoque híbrido unos mejores resultados que el uso solo del algoritmo genético (Zaghdoud et al., 2016).

5.6 Estudios realizados sobre ALVs

Este elemento, es un tanto peculiar a la hora de su estudio en el ámbito académico, debido a los distintos enfoques que este puede tomar, ya que se puede estudiar como vehículo de interconexión, o como interconexión y almacenamiento, dependiendo del rol que este tome.

Por tanto, en el caso de interconexión, los problemas a estudiar son los mismos que en otros vehículos, con la excepción de que se incluye un estudio que realiza una comparación entre AGVs y ALVs.

En cuanto a los estudios que combinan almacenamiento e interconexión, estos solamente pueden resolver problemas de *scheduling*.

Cabe destacar que, al contrario que los AGVs en su aplicación a terminales de contenedores, que han ido perdiendo relevancia progresivamente en el ámbito académico, el interés por los ALV se ha mantenido constante desde los primeros estudios realizados en 2001-2002, especialmente a partir de la publicación de la Tesis Doctoral de Meersmans.

5.6.1 Scheduling de ALVs como vehículo de interconexión

Puede parecer que los ALV tienen un alto grado de independencia, y es cierto, que facilitan mucho el desacoplamiento de movimientos, pero desde un punto de vista de problemas de optimización, sigue siendo necesario una programación conjunta de subsistemas (Meersmans, 2002).

Para una programación generalista, tradicionalmente, tal y como se ha visto anteriormente en otros subsistemas y maquinaria, se usa un algoritmo de ramificación y poda (Branch & Bound), aunque se ha llegado a la conclusión de que el uso de este, junto a un algoritmo DCA, se obtienen resultados de mayor calidad, debido a que este último algoritmo puede soportar una gran cantidad de variables, y resolver el problema en un menor tiempo (Le et al., 2012). También



ha habido propuestas para resolver la programación de ALVs con ventanas de tiempo, a través de un algoritmo genético (GA), comparándolo con una SA (*Simulated Annealing*), obteniéndose en ambos casos buenos resultados, aunque ligeramente mejores en el caso del GA (Moussi et al., 2011).

También se ha resuelto la programación de ALVs con MIP y con algoritmos heurísticos, obteniéndose buenos resultados de este último (Nguyen and Kim, 2009). En el mismo estudio se determinó que realizar operaciones de doble ciclo en las grúas de muelle, se disminuye el tiempo total de recorrido de los ALVs y el tiempo de retraso de las grúas de muelle, mejorándose, en definitiva, el rendimiento de la terminal (Nguyen and Kim, 2009).

5.6.2 Comparación con otra tipología de vehículos

En una comparación con los AGV, en una terminal con un sistema de almacenamiento sustentado en 8 bloques ASC, para diferentes grúas de muelle, tomándose como base de asignación de rutas aquella con un tiempo de trayecto mínimo, evitándose también bloqueos y colisiones (Bae et al., 2011). Para operaciones de descarga en buques, el óptimo se alcanza cuando el número de AGVs es 7 o el número de ALVs es 4. Para operaciones de carga en el buque, el rendimiento óptimo es alcanzado cuando el número de AGVs es de 7 y de ALVs es de 3. Tras alcanzar el óptimo, si se añaden más vehículos se observa que el rendimiento de los ALV disminuye antes que los AGV, debido a los bloqueos de tráfico que se puede producir, en comparativa con los AGVs, a cuyo tiempo de recorrido hay que sumarle un importante tiempo de espera debido a la incapacidad que tiene para desacoplar movimientos (Bae et al., 2011). En otra simulación de un estudio diferente, también se llegaron a conclusiones similares respecto al número de AGVs y ALVs, llegándose a un resultado bastante similar, si se comparan ratios (Vis and Harika, 2004).

Visto lo anterior, se tiene que el desacoplar movimientos, hace que los recursos necesarios para un mismo rendimiento operacional son menores, aumentando en gran medida la eficiencia, y reduciendo costes.

5.6.3 Scheduling de ALVs en almacenamiento e interconexión

Todos los problemas vistos anteriormente en el presente apartado estaban basados en el ALV como vehículo de interconexión puro, es decir, que solo realizaba el trayecto desde los bloques de almacenamiento hasta las grúas de muelle y viceversa, pero como se dijo anteriormente, el ALV, o Staddle Carrier automatizado, puede ser usado también como almacenamiento. Esto provoca



que los problemas se debe modelizar adecuadamente la terminal, siendo una mezcla de nodos, los cuales se pueden usar como ruta o como almacenamiento, siendo este último de dos alturas de apilado. También se deben de considerar en este problema los movimientos desde el almacenamiento hasta la puerta terrestre, añadiendo dos posibles movimientos más a los problemas anteriormente vistos. También se puede dar el caso de mover un contenedor que se encuentre en el almacenamiento a otro slot del mismo, añadiendo otro movimiento, y siendo un total de 5 en este problema. Este último tipo de movimientos se considera el menos prioritario de todos (Skinner et al., 2013).

En un estudio realizado en base a la terminal AutoStrad de Brisbane (Australia), se compara la metodología de programación actual, basada en la priorización de prevención de colisiones y en un algoritmo derivado de un algoritmo basado en ventanas de tiempo para cada vehículo (*single-vehicle time-window-based algorithm*) (Skinner et al., 2013). También se aplica una pre-optimización para la programación estructural de tareas (Skinner et al., 2013).

Por el contrario, se propone un algoritmo genético para la programación (*scheduling*). Para poder evaluar los resultados el algoritmo de Dijkstra es el empleado para contabilizar el tiempo de recorrido. Los tiempos de espera, tanto de grúas de muelle, ALVs y camiones externos se calculan de manera conjunta. Se realiza una comparación, considerando una priorización de tareas, siendo el objetivo la minimización de tiempos de espera en las grúas de muelle y en los camiones externos (Skinner et al., 2013). Computacionalmente, los dos algoritmos obtienen resultados parecidos, aunque a nivel de *scheduling*, el algoritmo genético logra una amplia ventaja en la minimización de los tiempos de espera (Skinner et al., 2013).

Posteriormente, se compara este algoritmo genético con la programación actualmente dispuesta en AutoStrad Brisbane, haciendo 12 simulaciones con un número diferente de ALVs y tareas, obteniendo el algoritmo genético mejores resultados, excepto en un caso, donde la tarea era muy sencilla, en la cual ambos algoritmos obtienen el mismo resultado (Skinner et al., 2013).

5.7 Estudios realizados sobre L-AGV

Los Lift-AGV, es un tipo de vehículo un tanto particular, porque básicamente es un AGV, con las características respecto a velocidad, maniobrabilidad y prevención de colisiones. Pero, además, también tiene la ventaja de desacoplar movimientos.



Es por ello, que los estudios posibles en este tipo de vehículos son dos: resolver problemas de *scheduling* y realizar comparaciones con otro tipo de vehículos

5.7.1 Scheduling

No se ha encontrado ningún problema de scheduling, pese a que su resolución no sería muy complicada, debido a que son válidas las formulaciones realizadas para AGVs, y únicamente añadiendo el desacople de movimientos. Esto último se debería de coger de los problemas de ALVs, aunque cambiando el tamaño del buffer, debido a que este está limitado por la instalación de guías, no como en los anteriores que se deja el contenedor en suelo.

5.7.2 Comparación entre vehículos

No se ha encontrado ningún artículo que realice una comparación de L-AGVs con otro vehículo de interconexión.

5.8 Estudios realizados sobre C-AGV

El Cassette-AGV, dado que a diferencia del L-AGV, sufre modificaciones sustanciales respecto al AGV, sí que pueden ser objeto de estudio los siguientes problemas:

- Rutas de vehículos
- Prevención de colisiones
- Asignación de tareas
- *Scheduling*
- Comparación con otro tipo de vehículo

Finalmente, no se ha encontrado ningún estudio sobre este tipo de vehículo de interconexión.

5.9 Estudios realizados sobre IAV

Este vehículo al ser novedoso, siendo estudiado a raíz de un proyecto europeo, se ha considerado incluir los problemas resueltos sobre el mismo en el apartado 4.3.5. Pero se ha de mencionar que se resolvieron algunos problemas de interés, que se enumeran a continuación:

- Toma de decisiones y comunicaciones entre vehículos



- *Scheduling*
- Comparación con otros tipos de vehículos

Cabe mencionar que se estudió algo de rutas de este tipo de vehículo, pero no de forma específica, ni aislada, sino dentro del problema de comparación con otro tipo de vehículo.

5.10 Problemas de estudio conjunto de varios subsistemas

Este tipo de problemas son cruciales para cualquier terminal automatizada, ya que como se ha hablado anteriormente, sin una optimización conjunta de todos los subsistemas que componen la terminal, y en especial las grúas de muelle, interconexión y almacenamiento, resulta difícil poder llegar a una eficiencia completa, y aprovechar al máximo los recursos de la terminal, siendo esto especialmente importante en terminales completamente automatizadas.

5.10.1 Optimización de interconexión y grúas de muelle

El hecho que los diferentes subsistemas, y en concreto, la maquinaria esté automatizada, pero no optimizada para que se produzca una operación conjunta entre los mismos, lleva a una pérdida de eficiencia, con un resultado por debajo de lo esperado, pudiendo llegar incluso a situaciones de bloqueo mutuo (Lau and Zhao, 2008). También se debe de tener en cuenta la incertidumbre en cuanto a tiempos de operación, siendo en muchas ocasiones, independientes del resto de la terminal, en concreto, el problema estudiado por Lau & Zhao, muestra que, aunque se aumente el número de AGVs en una terminal, llega un punto en el cual el rendimiento no mejora, siendo esto achacable a las grúas STS (Lau and Zhao, 2008).

Uno de los primeros problemas de optimización conjunta de varios subsistemas en terminales de contenedores automatizadas fue el llevado a cabo por Patrick Meersmans. En el mismo, toma como base la terminal ECT Delta del puerto de Rotterdam, resolviendo el problema de carga de un buque, teniendo en cuenta, el almacenamiento, interconexión (AGVs) y grúas de muelle. Es interesante la distinción que hace entre AGV, dividiendo aquellos que transitan en bucle, pasando todos por un punto común, y aquellos que no lo hacen. Para resolver el problema se emplea un algoritmo de ramificación y poda (Branch & Bound), desarrollando posteriormente un algoritmo Beam Search y un MIP. Una de las conclusiones más relevantes es que un layout que en un principio tenga una mayor productividad por el menor recorrido de los AGVs, al ser el problema de



optimización más difícil de resolver, se pueden tener grandes diferencias en la realidad (Meersmans, 2002).

Un caso de ello es la programación conjunta de grúas pórtico de muelle y AGVs usando un algoritmo genético (GA) basándose en el tiempo acumulativo de viaje de los AGVs y del tiempo operacional de la grúa STS (Homayouni et al., 2009). Además, se emplean técnicas heurísticas para encontrar el AGV que puede alcanzar el punto de inicio de la tarea (carga o descarga de un contenedor) más pronto (Homayouni et al., 2009). Para la asignación de la lista de tareas se emplea el algoritmo genético (GA). En el problema no se considera la posible congestión en la ruta de los AGVs, la limitación de capacidad de almacenamiento y que cuando la tarea finaliza, tanto para el AGV o la grúa STS, se queda en el lugar (Homayouni et al., 2009).

5.10.2 Optimización de interconexión, grúas de muelle y almacenamiento

También se ha estudiado la programación conjunta de grúas de muelle, AGVs y ARMGs, a través de un algoritmo heurístico con un GA. La peculiaridad de este estudio es que se consideran, no solo los procesos de carga y descarga, sino que estos se suponen simultáneos, y se realizan con una grúa Double Trolley. También se considera la optimización de rutas de los AGVs, con una prevención de la congestión, tratando de que la eficiencia conjunta de la terminal sea la máxima posible, siendo necesario para ello un correcto dimensionamiento del número de bloques de almacenamiento, grúas de muelle y AGVs (Yang et al., 2018). Otro estudio llevado a cabo sobre la optimización de programación integrada de almacenamiento, grúas de muelle y AGVs, con un GA, aunque con menor profundidad, es el llevado a cabo por Homayouni et al. (Homayouni et al., 2014).

Además, se han estudiado los ALVs como elemento de interconexión en una terminal automatizada, considerando una superposición de operaciones, es decir, que algunas grúas de muelle estén realizando operaciones de carga y otras de descarga, realizando un modelo conjunto de grúas STS, ASC y ALVs a través de un modelo estocástico, en concreto se usan Cadenas de Markov, junto a un algoritmo de convergencia iterativa para unir los modelos de ALVs y ASCs. También en la misma investigación se estudian los rendimientos en función de diferentes layouts y diferentes proporciones de contenedores cargados y descargados. Si se tiene un buen diseño de la terminal los tiempos no varían más de un 22% en comparativa de operaciones solapadas y operaciones simples de carga o descarga, aumentando en las primeras la capacidad de los ASCs en un 40% (Roy and de Koster, 2018).



5.10.2.1 Optimización basada en asignación de tareas

Otro enfoque que se puede dar a este tipo de problema es la asignación de tareas, de forma que se tenga en cuenta en este proceso la ruta de los AGVs para evitar cualquier tipo de colisión, teniendo en cuenta los demás subsistemas, especialmente el de carga y descarga. Para ello se emplea un flow-shop de tres etapas. En el nivel más alto se considera la asignación de tareas con el objetivo de reducir el tiempo total. En el nivel intermedio se asigna la tarea a cada máquina, y, por último, en el nivel más bajo se optimiza la ruta del AGV considerando evitar las colisiones. Además, en el mismo estudio se realizan simulaciones considerando las grúas de muelle y los ASC, combinando dinámicas de eventos discretos y dinámicas de tiempo continuo. A través de meta-heurísticas, se reduce la distancia recorrida de los AGVs, y con todo lo anterior, se garantiza la no existencia de colisiones (Xin et al., 2015). Una metodología muy parecida es usada por los mismos autores para realizar una programación conjunta de QCs, AGVs y ASCs, pero priorizando el consumo energético, objetivo realizado en el controlador del nivel más bajo (Xin et al., 2014). Esta optimización energética se realiza ajustando las velocidades, minimizando los tiempos de espera y maximizando la utilización de los equipos. La maquinaria que más energía consume son los ASCs seguidos de los AGVs (Xin et al., 2014).

Otro ejemplo de optimización conjunta en terminales automatizadas es el problema resuelto por Zheng et al., este tiene como punto de partida las grúas automatizadas del fabricante chino de grúas STS “ZPMC”, tratando de explorar la posible resolución del problema de aplicación del sistema *twin lift* de contenedores de 40'. Todo ello para tratar de integrar la aplicación de este concepto en la planificación de asignación de grúas, planificación de la estiba del buque, y la localización de los contenedores en el patio. Para resolverlo, se usa una heurística con dos pasos, siendo el primer paso la asignación de grúas, tratando cada grúa STS de forma individual en base a la carga de trabajo de cada grúa y usando el concepto *double cycle*. El segundo paso consiste en la resolución integrada de la planificación de grúas, es decir, tratando todas las grúas STS de manera conjunta y realizando las asignaciones a las grúas de patio (Zheng et al., 2010).



5.10.3 Optimización de interconexión y almacenamiento

Otro enfoque que se le puede dar a este tipo de problemas es no tratar la optimización únicamente desde la perspectiva operativa de la terminal, sino tratando de minimizar el tiempo de estancia del buque (Luo and Wu, 2015).

Para ello se consideran los subsistemas de interconexión (AGVs), almacenamiento y puerta marítima en operaciones solapadas, es decir, carga y descarga del buque simultáneamente. Aunque el problema tiene como objetivo la programación (scheduling) de los dos primeros subsistemas, y, además, considerando al subsistema de almacenamiento como el más importante por sus elevados costes, y separando los bloques entre aquellos que manejan contenedores de importación y contenedores de exportación (Luo and Wu, 2015).

Para resolver el problema, se emplea un algoritmo genético (GA) para aquellos problemas muy grandes y un algoritmo de ramificación y poda (B&B) para problemas de un menor tamaño, mientras que la formulación corresponde a un MIP. Los resultados computacionales del algoritmo B&B no resultan factibles incluso para problemas pequeños. En los resultados, se ve que el subsistema con mayor influencia a la hora de minimizar el tiempo de atraque es la puerta marítima (Luo and Wu, 2015).



Capítulo 6. Estado del conocimiento de automatización de TPC automatizadas en su implantación real.

6.1 Análisis de las terminales automatizadas y semiautomatizadas existentes

Para la toma de datos de las terminales se ha consultado principalmente imágenes por satélite de Google Earth y en el caso que las imágenes estuviesen incompletas o fuesen de mala calidad, se ha consultado Copernicus Open Access Hub (European Space Agency, n.d.) y EOS Land Viewer (EOS, n.d.). Todo ello se ha complementado con información puntual obtenida de la página web del operador o de la terminal y con visionado de vídeos de las terminales en funcionamiento.

En el presente epígrafe, se va a hacer una división entre terminales automatizadas y semiautomatizadas. En cada apartado se iniciará dando unos datos y estadísticas generales, para pasar posteriormente a analizar cada terminal, elaborando en cada caso una tabla-resumen, y comentando aquellos aspectos que resulten diferentes o destacables en cada caso. Por último, se finalizará cada apartado haciendo un análisis de los datos previamente mostrados. Cabe mencionar aquí una cuestión metodológica, y es que, cuando se hace referencia a “longitud de bloque promedio”, es una media ponderada. Además, también es remarcable que en la capacidad estática de almacenamiento no se cuentan los espacios para contenedores refrigerados (*reefers*), estandarizando los cálculos, haciendo la suposición que todos los contenedores son convencionales.

Para cerrar el apartado 5.1 se hará un listado de aquellas que se tenga constancia que estén en proceso de planificación o construcción.

6.1.1 Análisis de las terminales automatizadas

En total, existen 13 terminales completamente automatizadas, que son las que se muestran a continuación:

Localización	País	Operador	Nombre de la Terminal	Año
Melbourne	Australia	ICTSI	Victoria International Container Terminal	2014
Rotterdam	Países Bajos	APM Terminals	APM Terminal Maasvlakte II	2015
Rotterdam	Países Bajos	DP World	Rotterdam World Gateway (RWG)	2015
Rotterdam	Países Bajos	Hutchison	ECT Delta	1993
Sidney	Australia	Patrick	Sydney AutoStrad Terminal	2015
Qingdao	China	Qingdao New Qianwan Container Terminal Co. Ltd.	Qingdao New Qianwan Container Terminal	2017
Shanghai	China	Shanghai International Port Group	Shanghai Yangshan Deep Water Port	2018
Hamburgo	Alemania	HHLA	HHLA Container Terminal Altenwerder	2002
Los Angeles	USA	TraPac	TraPac Los Angeles Container Terminal	2017
Long Beach	USA	OOCL	Long Beach Container Terminal	2016
Brisbane	Australia	Patrick	Brisbane AutoStrad Terminal	2007
Nagoya	Japón	Nagoya Port Terminal Corporation	Tobishima Container Berth	2008
Rotterdam	Países Bajos	Hutchinson	ECT Euromax	2008

Figura 30. Listado de terminales completamente automatizadas.

A continuación, se muestra un gráfico en el que se puede observar la tendencia reciente en cuanto a automatización. Hay varios hechos llamativos como que el tiempo que pasó desde la primera terminal hasta la segunda fue de 9 años. También es llamativo que del periodo 2008-2013, hubiera 5 terminales automatizadas, siendo de algo más del doble las terminales que han empezado a operar en los últimos 6 años.

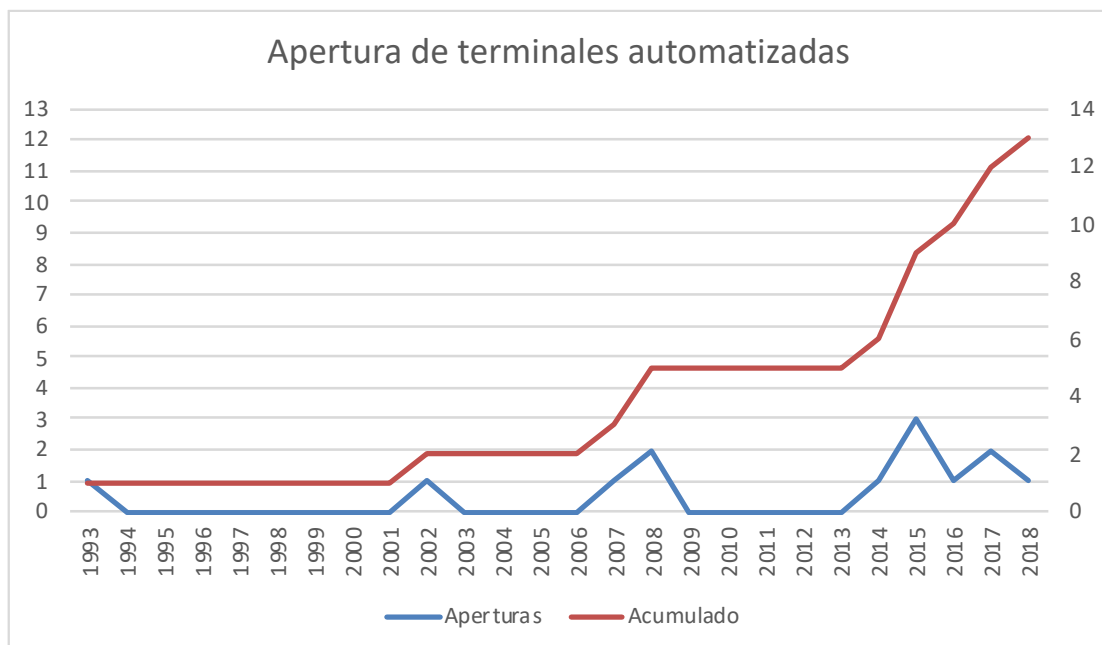


Figura 31. Años de apertura de terminales automatizadas.

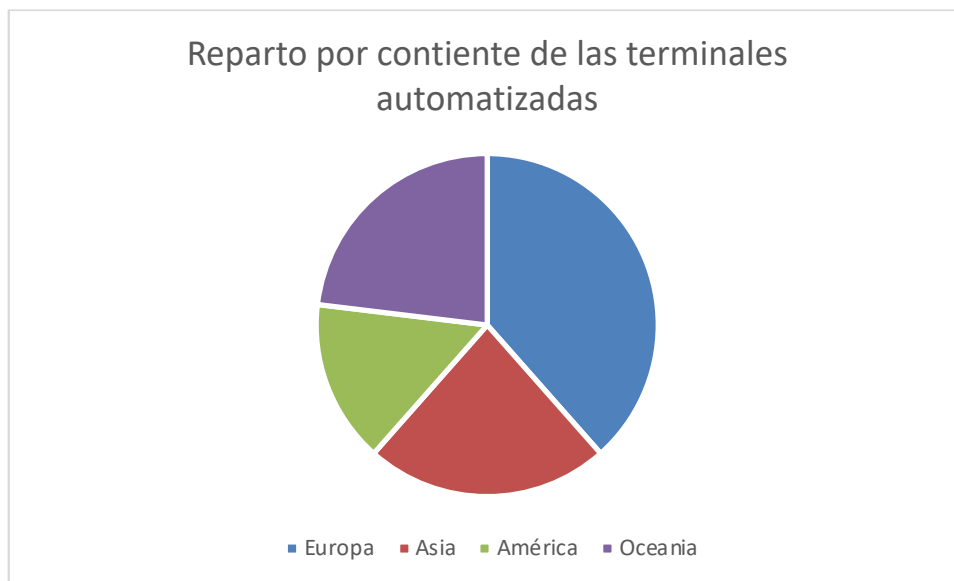


Figura 32. Reparto por continente de las terminales automatizadas.

Como se puede observar en el gráfico anterior, la ubicación geográfica de las terminales por continente resulta muy igualada, teniendo como máximo 5 (Europa) y como mínimo 2 (América).

Cabe destacar la gran concentración dentro de estas zonas geográficas de este tipo de terminales. Por ejemplo, de las 5 de Europa, 4 están en el puerto de Rotterdam, así como las dos de América se encuentran en la metrópolis de Los Ángeles (Los Ángeles y Long Beach).

6.1.1.1 Terminales con almacenamiento basado en ASCs

El sistema de almacenamiento mayoritario en las terminales completamente automatizadas es el basado en ASCs o ARMGs, siendo 10 de ellas (76%) de este tipo. A continuación, se van a ir viendo una por una.

6.1.1.1.1 ECT Delta

Esta terminal tiene bastantes peculiaridades, además de ser la primera, y probablemente por este motivo. En primer lugar, es la de mayor extensión, con 217 hectáreas. Tiene algunas áreas diferenciadas para buques *feeder*, siendo la más apreciable de ellas el atraque de la derecha. Resulta también llamativo la forma en la que se realiza la interconexión de los contenedores desde los camiones externos a los ARMGs, debido a que se hacen con Staddle Carriers con conductor.



Figura 33. Vista satelital de ECT Delta. Fuente: Google Earth.

En cuanto a los datos técnicos de la terminal, estos se adjuntan a continuación:

Terminal	ECT Delta
Localización	Rotterdam, Países Bajos
Operador	Hutchison
Año de apertura	1993
Línea de atraque (m)	3600 / 800 feeder
Grúas STS	43
Almacenamiento	ASC
ASC/ARTG por bloque	1
Nº de bloques	137
Nº de grúas de almacenamiento	137
Anchura del bloque	6
Altura de apilado	4
Longitud bloque promedio (m)	230
Longitud bloque promedio (TEUs)	40
Capacidad de almacenamiento (TEUs)	121.656
Vehículo de interconexión	AGV
Nº Vehículos interconexión	265

6.1.1.1.2 HHLA Container Terminal Altenwerder

La presente terminal fue la segunda en ser automatizada, e introdujo avances significativos, como las grúas STS *double trolley*, dos ARMGs por bloque pasantes. Tiene una extensión de 54 Ha. La disposición de los bloques es perpendicular al muelle y de igual tamaño. A continuación, se adjuntan las características de la terminal:

Terminal	HHLA Container Terminal Altenwerder
Localización	Hamburgo, Alemania
Operador	HHLA
Año de apertura	2002
Línea de atraque (m)	1400
Grúas STS	15
Almacenamiento	ASC
ASC/ARTG por bloque	2 (pasantes)
Nº de bloques	26
Nº de grúas de almacenamiento	52
Anchura del bloque	10
Altura de apilado	4
Longitud bloque promedio (m)	239
Longitud bloque promedio (TEUs)	37
Capacidad de almacenamiento (TEUs)	38.480
Vehículo de interconexión	AGV
Nº Vehículos interconexión	91

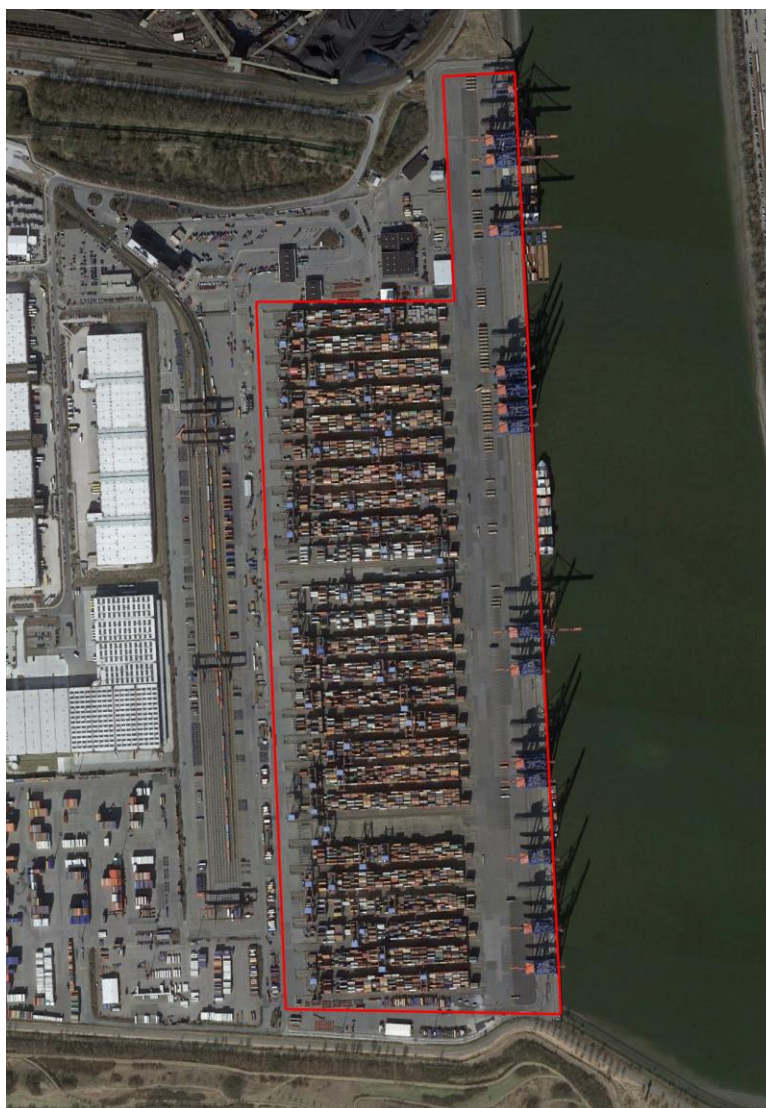


Figura 34. Vista satelital de HHLA CTA. Fuente: Google Earth.

6.1.1.1.3 ECT Euromax

Esta terminal, pese a que el operador es Hutchison, un 35% de la participación empresarial está en manos de la naviera china COSCO. Tal y como se puede observar en la imagen, de las 84 hectáreas, con un total de 46 bloques, solo 29 de ellos están operativos.

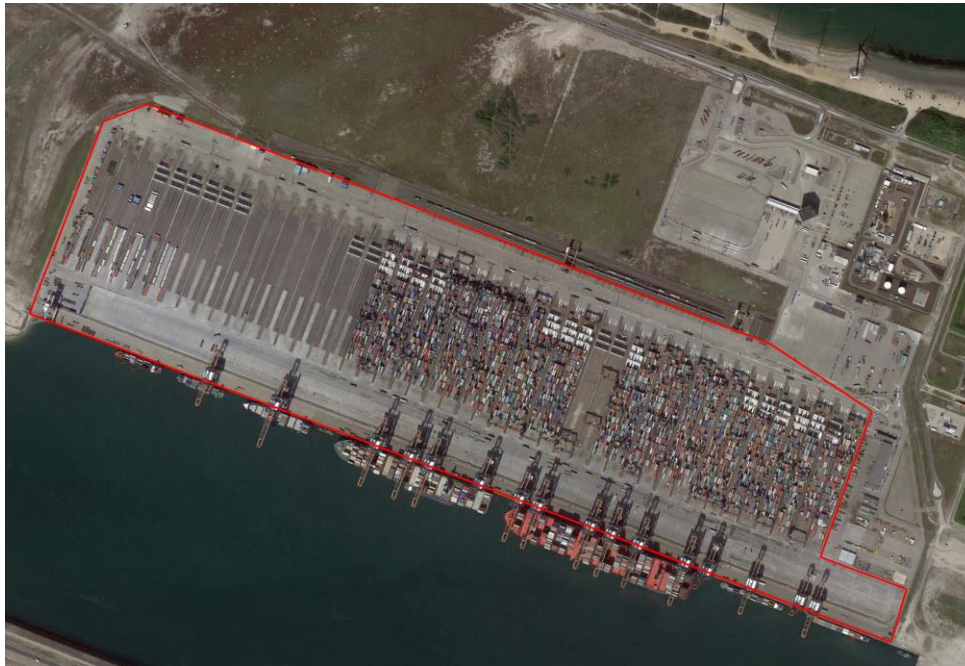


Figura 35. Vista satelital de ECT Euromax. Fuente: Google Earth.

Seguidamente se pueden observar los datos técnicos de la terminal:

Terminal	ECT Euromax
Localización	Rotterdam, Países Bajos
Operador	Hutchison
Año de apertura	2008
Línea de atraque (m)	1500
Grúas STS	16
Almacenamiento	ASC
ASC/ARTG por bloque	2
Nº de bloques	46 (29 operativos)
Nº de grúas de almacenamiento	58
Anchura del bloque	10
Altura de apilado	5
Longitud bloque promedio (m)	230
Longitud bloque promedio (TEUs)	36
Capacidad de almacenamiento (TEUs)	52.200
Vehículo de interconexión	AGV
Nº Vehículos interconexión	68



Nótese que para el cálculo de la capacidad de almacenamiento únicamente se han considerado en el cómputo aquellos bloques que están actualmente en funcionamiento.

6.1.1.1.4 Victoria International Container Terminal

La presente terminal resulta la de menor tamaño de todas las automatizadas, a nivel de superficie (16 Ha) y grúas de muelle. A continuación, se muestran los datos de la misma:

Terminal	Victoria International Container Terminal
Localización	Melbourne, Australia
Operador	ICTSI
Año de apertura	2014
Línea de atraque (m)	655
Grúas STS	5
Almacenamiento	ASC
ASC/ARTG por bloque	2
Nº de bloques	10
Nº de grúas de almacenamiento	20
Anchura del bloque	10
Altura de apilado	5
Longitud bloque promedio (m)	220
Longitud bloque promedio (TEUs)	32
Capacidad de almacenamiento (TEUs)	16.000
Vehículo de interconexión	ALV
Nº Vehículos interconexión	11

Cabe destacar que esta fue la primera terminal en incorporar el ALV como vehículo de interconexión puro, ya que, anteriormente se había implantado como vehículo de interconexión y almacenamiento en la terminal AutoStrad de Brisbane.

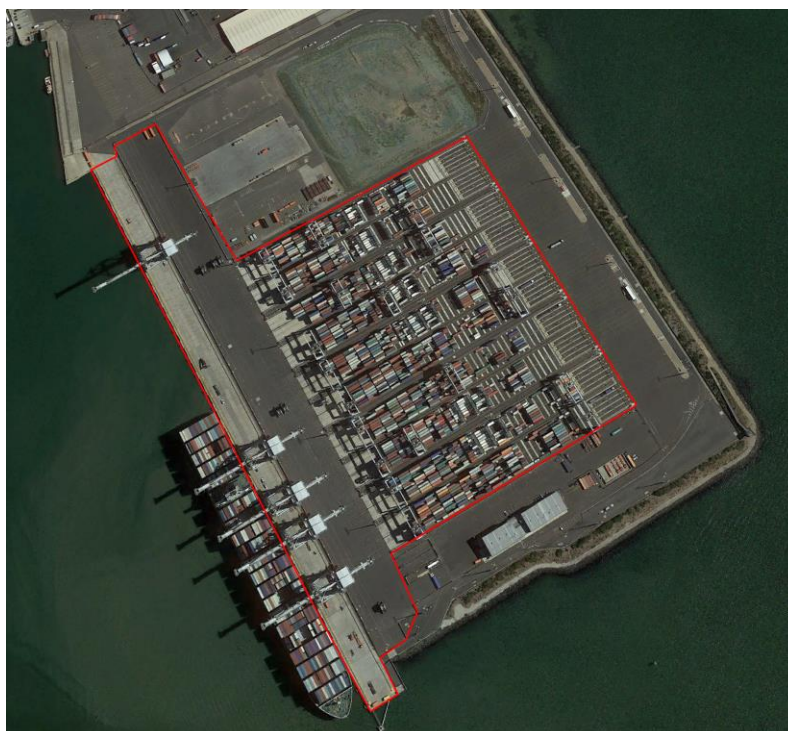


Figura 36. Vista satelital de Victoria International Container Terminal. Fuente: Google Earth.

6.1.1.1.5 Rotterdam World Gateway (RWG)

Al igual que ECT Delta, la presente terminal objeto de estudio tiene una línea de atraque secundaria específicamente destinada a buques feeder o barcazas fluviales. Cabe destacar, que junto a la terminal APM Terminals Maasvlakte II, inauguradas ambas el mismo año, fueron las primeras en introducir el L-AGV como vehículo de interconexión. También se ha de mencionar que, pese a que el operador es DP World, la terminal es una Joint Venture junto a las navieras CMA-CGM, Hyundai Merchant Marine y MOL.

En la siguiente tabla se pueden observar los datos de la terminal.

Terminal	Rotterdam World Gateway (RWG)
Localización	Rotterdam, Países Bajos
Operador	DP World
Año de apertura	2015
Línea de atraque (m)	1150 m/550 feeder
Grúas STS	14
Almacenamiento	ASC
ASC/ARTG por bloque	2
Nº de bloques	25
Nº de grúas de almacenamiento	50
Anchura del bloque	10
Altura de apilado	5
Longitud bloque promedio (m)	260 (excepto uno 231)
Longitud bloque promedio (TEUs)	40
Capacidad de almacenamiento (TEUs)	49.800
Vehículo de interconexión	L-AGV
Nº Vehículos interconexión	59



Figura 37. Vista satelital de RWG. Fuente: Google Earth.

6.1.1.1.6 APM Terminals Maasvlakte II

La presente terminal está considerada como la que mayor grado de automatización tiene. Además, al igual que RWG y ECT Delta, también tiene una zona destinada a buques *feeder*, tal y como se puede observar en la siguiente imagen, correspondiendo con la línea de atraque menor.



Figura 38. Vista satelital de APMT Maasvlakte II. Fuente: Google Earth.

A continuación, se muestran los datos de dicha terminal.

Terminal	APM Terminal Maasvlakte II
Localización	Rotterdam, Países Bajos
Operador	APM Terminals
Año de apertura	2015
Línea de atraque (m)	1000 m / 500m feeder
Grúas STS	11
Almacenamiento	ASC
ASC/ARTG por bloque	2
Nº de bloques	27
Nº de grúas de almacenamiento	54
Anchura del bloque	9
Altura de apilado	5
Longitud bloque promedio (m)	270
Longitud bloque promedio (TEUs)	42
Capacidad de almacenamiento (TEUs)	51.030
Vehículo de interconexión	L-AGV
Nº Vehículos interconexión	60

6.1.1.1.7 Long Beach Container Terminal

Esta terminal tiene como peculiaridad que fue la primera en aprovechar el espacio de una terminal convencional para realizar la automatización, aunque como se puede observar en el histórico de imágenes por satélite, tuvo una ganancia de espacio, algo poco frecuente en este tipo de reconversiones. Es por

ello, y como se puede observar en la imagen siguiente, que tiene una forma muy irregular.

Terminal	Long Beach Container Terminal
Localización	Long Beach, CA, USA
Operador	OOCL
Año de apertura	2016
Línea de atraque (m)	830
Grúas STS	10
Almacenamiento	ASC
ASC/ARTG por bloque	2 (excepto en 3 bloques que hay 1)
Nº de bloques	25
Nº de grúas de almacenamiento	47
Anchura del bloque	10
Altura de apilado	6
Longitud bloque promedio (m)	258
Longitud bloque promedio (TEUs)	36
Capacidad de almacenamiento (TEUs)	54.000
Vehículo de interconexión	AGV
Nº Vehículos interconexión	50



Figura 39. Vista satelital de Long Beach Container Terminal. Fuente: Google Earth.

6.1.1.1.8 TraPac Los Angeles Container Terminal

La automatización de esta terminal, al igual que la anterior (Long Beach Container Terminal), es fruto de la reconversión de una terminal convencional existente, teniendo también una forma irregular, y quedando algunas pocas

fases por realizar en el momento que se escriben estas líneas. Por tanto, los datos que se aportan a continuación son los actuales y no los futuros. Se puede destacar el hecho que haya bloques perpendiculares y paralelos al atraque.

Terminal	TraPac Los Angeles Container Terminal
Localización	Los Angeles, CA, USA
Operador	TraPac
Año de apertura	2017
Línea de atraque (m)	800
Grúas STS	7
Almacenamiento	ASC
ASC/ARTG por bloque	2
Nº de bloques	18
Nº de grúas de almacenamiento	36
Anchura del bloque	8 (1 de 10)
Altura de apilado	6
Longitud bloque promedio (m)	234
Longitud bloque promedio (TEUs)	35
Capacidad de almacenamiento (TEUs)	30.660
Vehículo de interconexión	ALV
Nº Vehículos interconexión	27

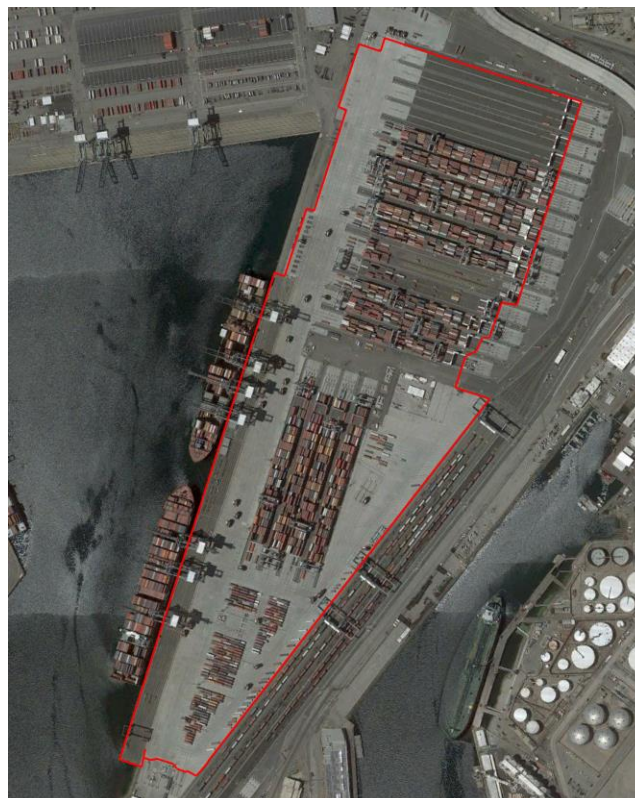


Figura 40. Vista satelital de TraPac LACT. Fuente: Google Earth.

6.1.1.1.9 Qingdao New Qianwan Container Terminal

Al igual que las terminales anteriores, la presente, también es fruto de un conversión y ampliación, y tal y como se puede observar en la imagen satelital,

es previsible su futura ampliación. En la siguiente tabla se puede observar los datos de esta terminal.

Terminal	Qingdao New Qianwan Container Terminal
Localización	Qingdao, China
Operador	Qingdao New Qianwan Container Terminal Co. Ltd.
Año de apertura	2017
Línea de atraque (m)	700
Grúas STS	7
Almacenamiento	ASC
ASC/ARTG por bloque	2
Nº de bloques	19
Nº de grúas de almacenamiento	38
Anchura del bloque	9
Altura de apilado	5
Longitud bloque promedio (m)	350
Longitud bloque promedio (TEUs)	54
Capacidad de almacenamiento (TEUs)	46.170
Vehículo de interconexión	L-AGV
Nº Vehículos interconexión	33



Figura 41. Vista satelital de Qingdao New Qianwan CT. Fuente: Google Earth.

6.1.1.1.10 Shanghai Yangshan Deep Water Port

Los datos mostrados a continuación se han de tomar como un cierto orden de magnitud, debido a que la baja calidad de las imágenes satelitales, así como información o material gráfico hacen que cierta información (como la altura

máxima de apilado) no se haya podido determinar con exactitud. La capacidad de almacenamiento se ha calculado con una altura de apilado de 6 contenedores, ya que se considera más probable.

Terminal	Shanghai Yangshan Deep Water Port
Localización	Shanghai, China
Operador	Shanghai International Port Group
Año de apertura	2018
Línea de atraque (m)	2350
Grúas STS	16
Almacenamiento	ASC
ASC/ARTG por bloque	2
Nº de bloques	57 (42 operativos)
Nº de grúas de almacenamiento	84
Anchura del bloque	8
Altura de apilado	5 o 6
Longitud bloque promedio (m)	276
Longitud bloque promedio (TEUs)	42
Capacidad de almacenamiento (TEUs)	84.672
Vehículo de interconexión	L-AGV
Nº Vehículos interconexión	130



Figura 42. Vista satelital de Shanghai Yangshan Deep Water Port. Fuente: (EOS, n.d.)



6.1.1.2 Terminales con almacenamiento basado en ARTGs

6.1.1.2.1 Tobishima Container Berth

Esta es la única terminal con una completa automatización que emplea ARTGs para el subsistema de almacenamiento. Se puede destacar la baja capacidad de almacenamiento de esta terminal, especialmente lastrada por una baja altura de apilado, en comparación con los ARMGs.

Terminal	Tobishima Container Berth
Localización	Nagoya, Japón
Operador	Nagoya Port Terminal Corporation
Año de apertura	2008
Línea de atraque (m)	685
Grúas STS	6
Almacenamiento	ARTG
ASC/ARTG por bloque	1
Nº de bloques	22
Nº de grúas de almacenamiento	22
Anchura del bloque	6
Altura de apilado	4
Longitud bloque promedio (m)	220
Longitud bloque promedio (TEUs)	33,5
Capacidad de almacenamiento (TEUs)	17.688
Vehículo de interconexión	AGV
Nº Vehículos interconexión	25

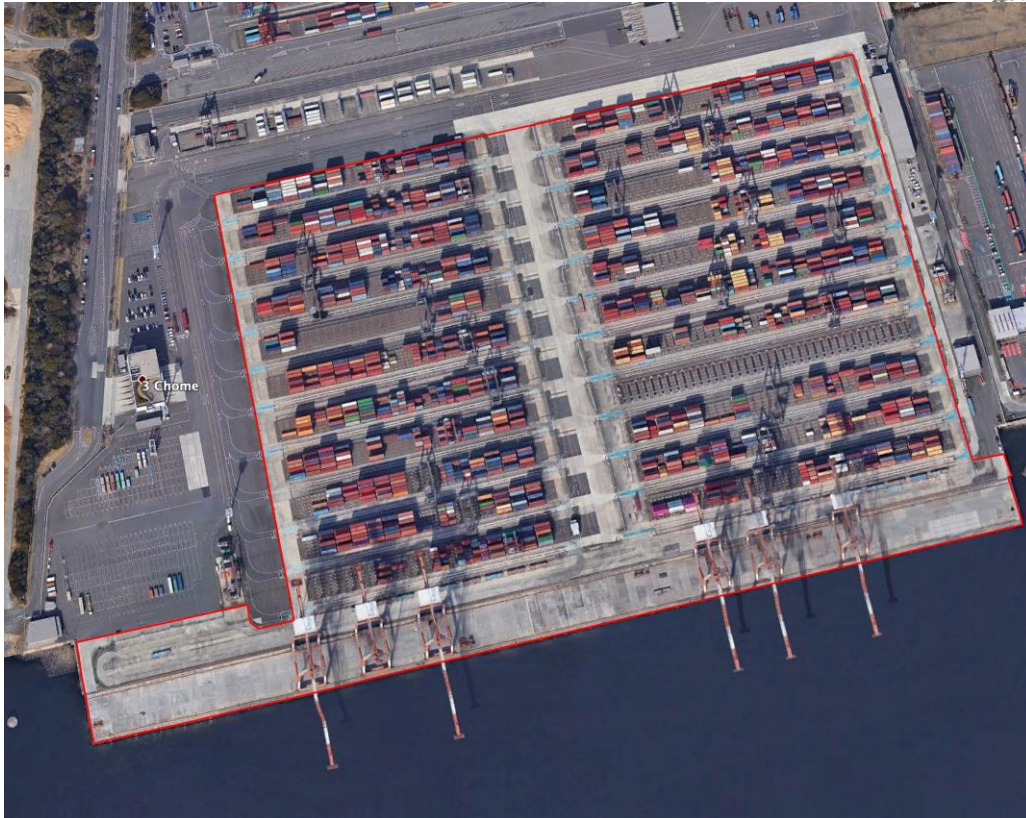


Figura 43. Vista satelital de Tobishima Container Berth. Fuente: Google Earth.

6.1.1.3 Terminales con almacenamiento basado en ALVs

6.1.1.3.1 Brisbane AutoStrad Terminal

La presente terminal fue la primera en incorporar al ALV, tanto en interconexión, como en almacenamiento. En la siguiente tabla se pueden observar los datos relativos a la misma.

Terminal	Brisbane AutoStrad Terminal
Localización	Brisbane, Australia
Operador	Patrick
Año de apertura	2007
Línea de atraque (m)	900
Grúas STS	5
Almacenamiento	ALV
Altura de apilado	2
Capacidad de almacenamiento (TEUs)	10.640
Área (Ha)	32
Vehículo de interconexión	ALV
Nº Vehículos interconexión	29

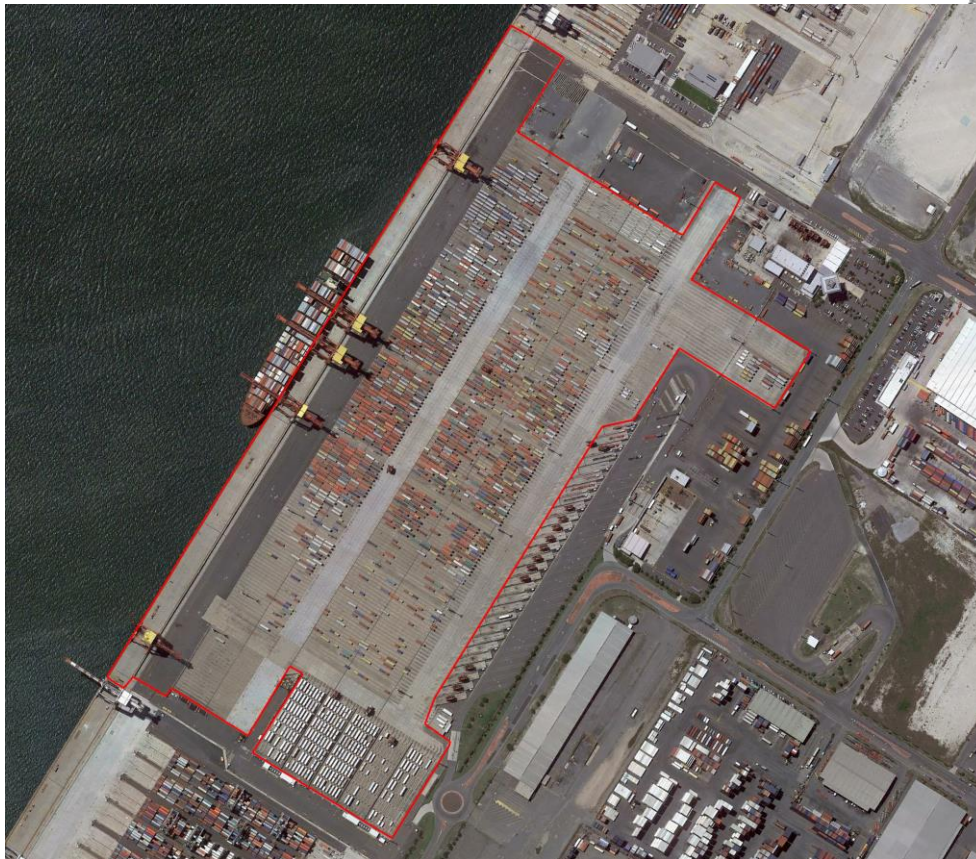


Figura 44. Vista satelital de Brisbane AutoStrad Terminal. Fuente: Google Earth.

6.1.1.3.2 Sydney AutoStrad Terminal

A continuación, se adjuntan los datos de esta terminal.

Terminal	Sydney AutoStrad Terminal
Localización	Sídney, Australia
Operador	Patrick
Año de apertura	2015
Línea de atraque (m)	1400
Grúas STS	9
Almacenamiento	ALV
Altura de apilado	2
Capacidad de almacenamiento (TEUs)	12.648
Área (Ha)	41
Vehículo de interconexión	ALV
Nº Vehículos interconexión	40

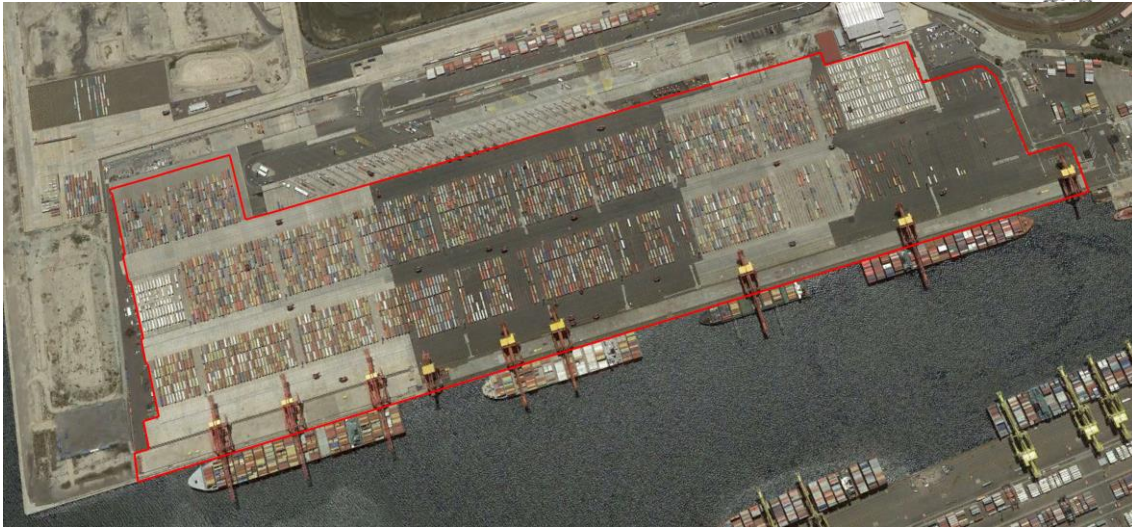


Figura 45. Vista satelital de Sydney AutoStrad Terminal. Fuente: Google Earth.

6.1.1.4 Estadísticas de las terminales automatizadas

En el presente apartado, se va a estudiar con mayor detenimiento los datos que han sido aportados a lo largo del presente apartado. En primer lugar, se va a hacer un estudio, dividiendo aquellas terminales por categoría de almacenamiento, y posteriormente por interconexión, en aquellos casos que sea posible. Por último, se estudiarán los datos más relevantes realizando una división geográfica

6.1.1.4.1 Estadísticas de las terminales automatizadas con almacenamiento basado en ASCs

En primer lugar, se va a hacer un tratamiento básico de los datos anteriormente mostrados, la media se realiza para saber cuál sería una “terminal tipo”, comprobando en base a la desviación típica el grado de dispersión, y, por tanto, de validez de cada apartado.

	Promedio	Desviación típica
Línea de atraque (m)	1.584	1.126
Nº bloques	35,8	36,5
Anchura bloque (contenedores)	9	1,3
Altura de apilado	5	0,7
ASC por bloque	1,9	0,3
Longitud bloque promedio (m)	256,7	37,8
Longitud bloque promedio (TEUs)	39,1	6,1
Grúas STS	14,4	10,8
Capacidad de almacenamiento (T)	53.941	30.040



Tal y como se puede observar en la tabla anterior, hay una gran dispersión en los apartados de línea de atraque, número de bloques y grúas de muelle, muy influenciado por la gran extensión de ECT Delta que hace que la dispersión de los datos sea mucho mayor. Lo que sí queda claro es que es que la gran tendencia es que se dispongan 2 ARMGs por bloque, contando este con una anchura de bloque de 9 contenedores y una altura de apilado de 5 contenedores. También es destacable la poca dispersión de la longitud de cada bloque medido en TEUs, lo que indica que, en cuanto a la morfología de bloque individual, no hay grandes diferencias.

Además, para poder realizar una comparación más completa a nivel geográfico y con otros sistemas de almacenamiento, se hace necesario medir la capacidad de almacenamiento en relación con la superficie de la terminal, datos que se muestran a continuación.

Nombre de la Terminal	Superficie (Ha)	TEUs/Ha
Victoria International Container Terminal	16,4	976
APM Terminal Maasvlakte II	47,2	1081
Rotterdam World Gateway (RWG)	54,3	921
ECT Delta	217	561
Qingdao New Qianwan Container Terminal	33,6	1374
Shanghai Yangshan Deep Water Port	87,8	964
HHLA Container Terminal Altenwerder	54	713
TraPac Los Angeles Container Terminal	34,3	735
Long Beach Container Terminal	37	1459
ECT Euromax	58	900

Cabe destacarse que, a la hora de medir la superficie, en el caso de tener una zona no operativa, esta no computa.

Hay ciertos datos anómalos en cuanto a los TEUs/Ha (HHLA Container Terminal Altenwerder, TraPac Los Angeles Container Terminal y ECT Delta) que tienen una explicación. En cuanto a la CTA de Hamburgo, se ve lastrada por una baja altura de apilado, al igual que lo hace ECT Delta, a la cual hay que sumarle, además, la gran extensión de los viales internos. Por otro lado, en TraPac Los Ángeles, el dato está influenciado por la actual reconversión que se está llevando a cabo en estos momentos, y que probablemente suba bastante cuando esta se complete.

Realizando una lectura global de los datos, queda claro que el almacenamiento más común en ASCs está en torno a los 900-1.000 TEU/Ha, muy en la línea de lo que se determinó en una publicación de la Fundación Valenciaport (Vieira Gonçalves de Souza et al., 2011), pudiendo llegar a los 1.500 como máximo, en el momento actual.



6.1.1.4.2 Estadísticas de las terminales automatizadas con almacenamiento basado en ARTGs

Debido a la sola existencia de una terminal, no es posible hacer un análisis tan detallado como el del anterior apartado, debiendo únicamente realizar una comparación con los resultados obtenidos anteriormente.

A nivel de capacidad almacenamiento por hectáreas, esta terminal, con una extensión de 24,3 Ha, arroja un resultado de 727 TEUs/Ha. Esto indica que un sistema de almacenamiento basado en ARTGs tiene una densidad de almacenamiento entre 200 y 300 TEUs menos por hectárea, tal y como proponían Viera et al. En una de sus publicaciones para terminales convencionales, donde tal densidad era de 880 TEUs/Ha (Vieira Gonçalves de Souza et al., 2011).

6.1.1.4.3 Estadísticas de las terminales automatizadas con almacenamiento basado en ALVs

Tal y como sucede en el apartado anterior, la baja implantación de estas terminales no permite un análisis detallado, pudiendo examinar únicamente algunos aspectos comparativos y generales.

En primer lugar, llama la atención el relativo bajo número de vehículos, que sirven tanto para almacenamiento como interconexión, lo cual puede suponer un ahorro muy importante en inversión de capital. Por el contrario, se tiene una baja capacidad de almacenamiento y unas densidades próximas de 320 TEUs/Ha.

Por tanto, la mayor conclusión que se puede extraer en cuanto a la implantación de este sistema de almacenamiento, es que es idóneo para terminales que pueden tener una gran extensión a un bajo coste, con un tráfico medio, no superior a 1,5 millones de TEUs anuales y con una posible restricción presupuestaria a nivel de inversión.

Terminal	Sydney AutoStrad Terminal	Brisbane AutoStrad Terminal
ALV por STS	4,4	5,8
ALV /Ha	0,98	0,91
TEUs/ALV	318	367

Como se puede observar, en cuanto al número de vehículos, se puede extraer que en este tipo de terminales se disponga un vehículo en una relación de 0,9-1 hectárea. Es por ello, que el número de vehículos está relacionado indirectamente con la densidad de almacenamiento.



Por otro lado, queda claro, pese a que había una gran dispersión en el número de grúas de muelle, que la asignación cuantitativa a cada grúa está entre 4 y 6.

6.1.1.4.4 Estadísticas de las terminales automatizadas con interconexión basada en AGVs

En este apartado se van a examinar aquellas terminales que tengan como vehículo de interconexión AGVs, independientemente de su almacenamiento. Al igual que el apartado anterior se examina el número de vehículos por cada grúa de muelle, por hectárea, por bloque y por cada grúa del subsistema de almacenamiento. Finalmente, se examina el número de TEUs por cada AGV.

Terminal	ECT Delta	HHLA CTA	LBCT	ECT Euromax	Tobishima Container Berth
AGV por STS	6,2	6,1	5,0	4,3	4,2
AGV/Ha	1,2	1,7	1,4	1,2	1,0
AGV por bloque	1,9	3,5	2,0	2,3	1,1
AGV por ASC/ARTG	1,9	1,8	1,1	1,2	1,1
TEUs/AGV	459,1	422,9	1080,0	767,6	707,5

Viendo los resultados obtenidos en el apartado anterior, y empezando por la relación entre grúas de muelle y vehículos, se puede observar una cierta dispersión, aunque también una gran diferencia entre las terminales más antiguas y las más nuevas. En cuanto a superficie, queda claro que el número de AGVs por Ha debe ser entre 1 y 1,5.

Posteriormente, en la comparación del número de AGVs por bloque de almacenamiento, se ve claramente la diferencia entre la terminal de ARTGs y las de ARMGs, ya que en el caso de la primera está en el entorno de 1, y en el caso de la segunda sobre 2, e incluso algo superior.

En cuanto a la asignación de vehículos a cada grúa de almacenamiento, se nota cierta diferencia entre las terminales más antiguas y las más modernas, aspecto que también se puede observar si se compara la capacidad de almacenamiento con el número de vehículos.

6.1.1.4.5 Estadísticas de las terminales automatizadas con interconexión basada en L-AGV

Terminal	PM Terminal Maasvlakte	RWG	Qingdao NQCT	Shanghai YDWP
L-AGV por STS	5,5	4,2	4,7	8,1
L-AGV/Ha	1,3	1,1	1,0	1,5
L-AGV por bloque	2,2	2,4	1,7	4,5
L-AGV por ASC/ARTG	1,1	1,2	0,9	1,5
TEUs/L-AGV	850,5	847,5	1399,1	651,3



De los datos mostrados anteriormente, cabe destacar la gran coincidencia del 75% de las terminales, teniendo la terminal de Shanghai unos datos ciertamente anómalos, quizá porque no están operativos todos los bloques.

6.1.1.4.6 Estadísticas de las terminales automatizadas con interconexión basada en ALVs

A continuación, se adjuntan los datos de la única terminal con este tipo de vehículo de interconexión.

Terminal	TraPac Los Angeles Container Terminal
ALV por STS	3,9
ALV/Ha	0,8
ALV por bloque	1,5
ALV por ASC/ARTG	0,8
TEUs/ALV	3600

6.1.1.4.7 Estadísticas de las terminales automatizadas a nivel geográfico

Una vez visto todo lo anterior, se ha de mencionar algunas diferencias notables de las terminales situadas en diferentes regiones.

En primer lugar, se nota una línea de atraque ligeramente superior en las terminales europeas, y en cierta medida en las Chinas (cabe recordar que la terminal de Qingdao está en expansión y su línea de atraque aumentará). Por el contrario, la línea de atraque es menor en las terminales americanas y en las australianas, aunque en este último case hay algo de dispersión.

Lo anterior, junto a la extensión de la terminal son los únicos datos remarcables. De hecho, en las terminales automatizadas se nota una diferencia mayor si se realiza un análisis a nivel temporal de las diferencias entre las terminales pioneras y las más recientes que a nivel geográfico.

6.1.1.4.8 Discusión

Continuando con lo expuesto en el apartado anterior, no hay una gran diferencia en cuanto el diseño de una terminal automatizada, encontrándose las mayores diferencias dependiendo de la maquinaria usada, y de la extensión de la terminal.

En cuanto a las terminales basadas en almacenamiento con ARMGs, que son las mayoritarias, se observa que los criterios de diseño son muy parecidos en cuanto a anchura del bloque, apilado y disposición del mismo respecto al muelle,



que es perpendicular. En cuanto a la longitud del mismo y número, estas variables dependen de la superficie.

Por tanto, lo más destacable de este apartado es:

- Existe cierto consenso en el diseño del subsistema de almacenamiento.
- La tendencia actual es la reconversión de terminales convencionales o semiautomatizadas en automatizadas, siendo escaso el número de nuevas implantaciones, aunque no se deben obviar (por ejemplo, Shanghai, Valencia, etc.).
- No hay unos criterios claros en cuanto al vehículo de interconexión a implantar en cada caso, aunque si se puede observar cierta tendencia hacia vehículos que tienen la capacidad para desacoplar movimientos (ALV, L-AGV).



6.1.2 Análisis de las terminales semiautomatizadas

En este apartado se van a estudiar las terminales semiautomatizadas existentes. Lo más común es que tengan el subsistema de almacenamiento automatizado, o incluso solo una parte de este, en cuyo caso, se indicará. En este tipo de terminales también es de interés ver si ha sido una nueva implantación o ha sido una reconversión de una terminal convencional ya existente.

Cabe destacar la poca publicidad que se hace de este tipo de terminales, y la dificultad de obtener la información necesaria, especialmente en el continente asiático.

La metodología que se va a seguir es la misma que se ha empleado en el estudio de las terminales automatizadas, así como los aspectos a estudiar. Aunque se debe de realizar una puntualización en el caso de algunas terminales que únicamente tienen una parte del almacenamiento automatizado. En ese caso, la superficie medida corresponde a la parte automatizada y al muelle, contándose únicamente los datos de la parte automatizada.

A continuación, se adjuntan los listados de las terminales semiautomatizadas, y seguidamente, el listado de aquellas que solo tienen una parte del almacenamiento automatizado.

Localización	País	Operador	Nombre de la terminal
Ámberes	Bélgica	DP World	Antwerp Gateway
Bayonne, NJ	Estados Unidos	Global Container Terminals	GCT Bayonne
Norfolk, VA	Estados Unidos	Norfolk International Terminals	Norfolk International Terminals South
Hamburgo	Alemania	HHLA	HHLA Terminal Burchardkai
Colón	Panamá	Carrix y SSA Marine	Manzanillo International Terminal
Xiamen	China	COSCO	Xiamen Ocean Gate Container Terminal

Figura 46. Listado de terminales con el subsistema de almacenamiento parcialmente automatizado.



Localización	País	Operador	Nombre de la terminal	Año
Singapur	Singapur	PSA	Pasir Panjang Terminal 1	1997
Tokyo	Japón	Wan Hai Lines	Oi Container Terminal Berth 5	2003
Kaohsiung	Taiwan	Evergreen	EVERGREEN KAOHSIUNG CONTAINER TERMINAL (K79-K81)	2005
Porsmouth, VA	Estados Unidos	Virginia International Gateway	Virginia International Gateway	2008
Taipei	Taiwan	Taipei Port Container Terminal Corp. (Evergreen, Yang Ming y	Taipei Port Container Terminal	2009
Busan	Corea del Sur	Hyundai Merchant Marine & PSA	Hyundai Pusan New-Port Terminal	2009
Busan	Corea del Sur	DP World	Pusan Newport Company	2009
Busan	Corea del Sur	Hanjin Kal & PSA	Hanjin Busan Newport	2009
Busan	Corea del Sur	Hyundai & PSA	Pusan Newport International Terminal	2010
Algeciras	España	Hyundai Merchant Marine	TTI Algeciras	2010
Kaohsiung	Taiwan	Yang Ming	Kao Ming Container Terminal	2011
Busan	Corea del Sur	BNCT Co. Ltd.	Busan New Container Terminal	2011
Abu Dhabi	EAU	Abu Dhabi Terminals (ADT)	Khalifa Port Container Terminal	2012
Barcelona	España	Hutchison	BEST	2012
Jebel Ali	EAU	DP World	Jebel Ali Terminal 3	2014
Surabaya	Indonesia	Pelindo III (51%) & DP World	Teluk Lamong Terminal	2014
Sydney	Australia	Hutchison	Sydney International Container Terminals (SICTL)	2014
Brisbane	Australia	Hutchison	Brisbane Container Terminals	2014
Brisbane	Australia	DP World	DP World Australia's Brisbane Terminal	2014
Londres	Reino Unido	DP World	London Gateway	2014
Singapur	Singapur	COSCO-PSA (4,6), CMA CGM-PSA	Pasir Panjang Terminals 4, 5 & 6	2015
Incheon	Corea del Sur	Sunk Wang	Sunkwang Newport Container Terminal	2015
Keelung	Taiwan	INTERNATIONAL PORTS CORPORATION, LTD.	West Coast Container Terminal: North Container	2016
Incheon	Corea del Sur	Hanjin Kal	Hanjin Incheon Container Terminal	2016
Tuxpan	México	Carrix y SSA Marine	Tuxpan Port Terminal	2016
Semarang	Indonesia	Pelindo III	Terminal Petikemas Semarang	2016
Kaohsiung	Taiwan	TAIWAN INTERNATIONAL PORTS CORPORATION, LTD.	Kaohsiung berth 120	2017
Liverpool	Reino Unido	Peel Ports	Liverpool2	2017
Lázaro Cárdenas	México	APM Terminals	Lázaro Cardenas	2017
Tanger Med	Marruecos	APM Terminals	Tanger Med II	2019

Figura 47. Listado de las terminales semiautomatizadas con el subsistema de almacenamiento completamente automatizado.

Además, se tiene constancia de cuatro terminales que van a ser semiautomatizadas. En primer lugar, se tiene la terminal “APM Terminals Vado Ligure”, situada en Vado Ligure (Italia), que tiene el almacenamiento basado en ARMGs, y cuyo inicio de operaciones está previsto para diciembre de 2019.

En segundo lugar, se tiene el puerto de Felixtowe, cuya automatización la va a realizar Siemens, y se va a automatizar tanto los RTGs, como las grúas de muelle (“Siemens to Automate Eight ARTGs for Felixstowe,” 2018).

En tercer lugar, se tiene de Dublin Ferryports Terminal, cuya automatización va a estar basada en ARTGs, estando dos de ellos en pruebas actualmente (“Kalmar to extend AutoRTG system at Dublin Ferryport Terminals to further improve operational efficiency | Kalmarglobal,” n.d.).

Por último, se tiene Jebel Ali Terminal 4, cuya fecha de apertura es todavía incierta.

Cabe destacar que todas las terminales de este apartado han automatizado el almacenamiento. Cabe destacar que Tanger Med II tiene el avance de que las grúas de muelle están operadas en remoto, mientras que la terminal de Xiamen se considera semiautomatizada, pese a que tiene la interconexión basada en AGVs, y el almacenamiento en ASCs, debido a que esto solo está extendido a una pequeña parte de la terminal.

En total se tienen 30 terminales semiautomatizadas y 6 en proceso, aunque la CTB de Hamburgo y Xiamen es factible que en cuanto se complete el proceso sean terminales completamente automatizadas.

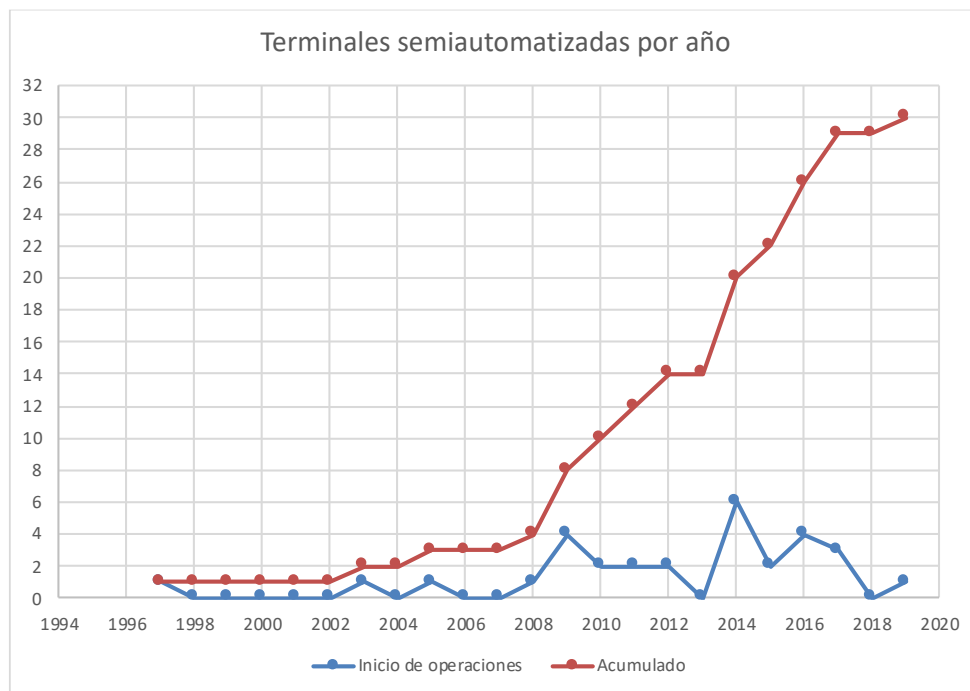


Figura 48. Terminales semiautomatizadas por año de inicio de operaciones.

Tal y como se puede observar en el gráfico anterior, las terminales semiautomatizadas iniciaron su andanza un poco más tarde que las automatizadas, con la puesta en marcha de Pasir Panjang 1, en 1997. Posteriormente, únicamente se inauguraron un par hasta el año 2008, cuando

se produce la eclosión de este tipo de terminales, con un crecimiento exponencial.

Al igual que sucede con las terminales automatizadas, el sistema con mayor implantación son los ARMGs. De las 30 que ya tienen la automatización del subsistema de almacenamiento por completo, 28 usan ARMGs o CARMGs, una ARTGs y la restante OHBC.

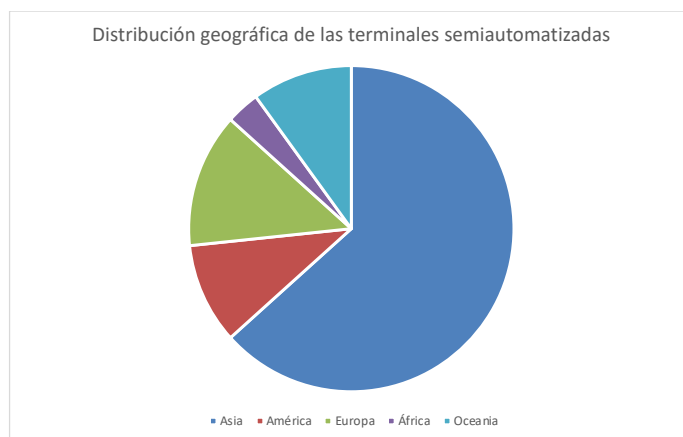


Figura 49. Distribución geográfica de las terminales semiautomatizadas.

Como se puede apreciar en el gráfico anterior, Asia es el lugar donde más se concentran este tipo de terminales con 19, estando concentradas principalmente en Corea del Sur, Taiwán y Singapur. Posteriormente le sigue Europa con 4 terminales, América con 3 y África con 1.

6.1.2.1 Terminales con almacenamiento basado en OHBC

6.1.2.1.1 Pasir Panjang Terminal 1

Tal y como se ha comentado en el apartado de OHBCs, esta terminal fue la primera (y única) de este tipo. Inaugurada en el año 1997, tiene muchas peculiaridades. La primera de ellas es, que pese a basar la mayor parte del subsistema de almacenamiento, también se disponen de CRMGs (no se ha podido comprobar si están automatizados o no, aunque es probable que sí lo estén).

A continuación, se adjuntan los datos técnicos de esta terminal.

Terminal	Pasir Panjang Terminal 1
Localización	Singapur
Operador	PSA
Año de apertura	1997
Línea de atraque (m)	2145
Grúas STS	24
Almacenamiento	OHBC // CRMG
ASC/ARTG por bloque	No aplicable // 6
Nº de bloques	6 // 2
Nº de grúas de almacenamiento	32 // 12
Anchura del bloque	10 // 12
Altura de apilado	6 // 6
Longitud bloque promedio (m)	237 // 1100
Longitud bloque promedio (TEUs)	36 // 160
Capacidad de almacenamiento (TEUs)	51.840 // 46.220
Capacidad de almacenamiento total (TEUs)	98.060
Vehículo de interconexión	Truck Terminal (AGVs en pruebas)

Viendo la anterior tabla, una de las cosas que más sorprenden es la poca densidad de almacenamiento que tiene el OHBC, en comparación con el CRMG, ya que tiene un mayor ancho de bloque.



Figura 50. Imagen satelital de Pasir Panjang Terminal 1. Fuente: Google Earth.

En general, se tiene una densidad de almacenamiento de 1.286 TEUs/Ha, con una ratio de capacidad de almacenamiento por grúa STS de 4.086.



6.1.2.2 Terminales semiautomatizadas con almacenamiento basado en ARTGs

6.1.2.2.1 Terminal Petikemas Semarang

Como se ha mencionado anteriormente, esta es actualmente la única terminal semiautomatizada con ARTGs.

Los datos de la terminal se muestran en la siguiente tabla:

Terminal	Terminal Petikemas Semarang
Localización	Semarang, Indonesia
Operador	Pelindo III
Año de apertura	2016
Línea de atraque (m)	615
Grúas STS	7
Almacenamiento	ARTGs
ASC/ARTG por bloque	1,5
Nº de bloques	14
Nº de grúas de almacenamiento	25
Anchura del bloque	6
Altura de apilado	4
Longitud bloque promedio (m)	195
Longitud bloque promedio (TEUs)	28
Capacidad de almacenamiento (TEUs)	11.424
Vehículo de interconexión	Truck Terminal

Esta terminal, es de un tamaño medio, ya que maneja una cifra ligeramente superior al millón de TEUs anuales, además de disponer de un tamaño reducido (17,74 Ha), lo que le hace idónea para este tipo de automatización. Una de las cosas que más llama la atención es que dada la posibilidad que tienen los ARTGs de moverse entre bloques, no existe un número fijo de grúas asignadas a un bloque.

Debido a que no se tiene ninguna referencia más, excepto la terminal automatizada de Nagoya, se va a hacer una cierta comparación con esta.

En primer lugar, destaca el hecho que no haya grandes diferencias en cuanto al bloque promedio, estando en ambos casos sobre los 200 metros, al igual que la anchura del mismo y la altura de apilado, siendo estos últimos dos parámetros exactamente iguales en ambas terminales.

En cuanto a los TEUs por hectárea, se tiene una relación de 644 TEUs/Ha, dato algo inferior a la terminal automatizada de Nagoya. Y en cuanto a la relación de

capacidad de almacenamiento por grúa STS, se tiene un ratio de 1.632 TEUs/STS.



Figura 51. Vista satelital de Petikemas Semarang, Fuente: Google Earth.

6.1.2.3 Terminales semiautomatizadas con almacenamiento basado en ARMGs

6.1.2.3.1 Oi Container Terminal Berth 5

La terminal estudiada en el presente apartado presenta alguna peculiaridad. Una de ellas es que se usa uno de los voladizos que dispone el CARMG como espacio de almacenamiento, ganando una anchura extra en cada bloque de tres contenedores. Esto es especialmente importante en una ciudad como Tokyo, y dado el escaso espacio de la terminal (9,67 Ha). En la siguiente tabla se pueden observar el resto de datos de la terminal.

Terminal	Oi Container Terminal Berth 5
Localización	Tokyo, Japón
Operador	Wan Hai Lines
Año de apertura	2003
Línea de atraque (m)	330
Grúas STS	3
Almacenamiento	CARMG
ASC por bloque	2
Nº de bloques	4
Nº de grúas de almacenamiento	8
Anchura del bloque	15
Altura de apilado	5
Longitud bloque promedio (m)	278
Longitud bloque promedio (TEUs)	44
Capacidad de almacenamiento (TEUs)	13.200
Vehículo de interconexión	Truck Terminal

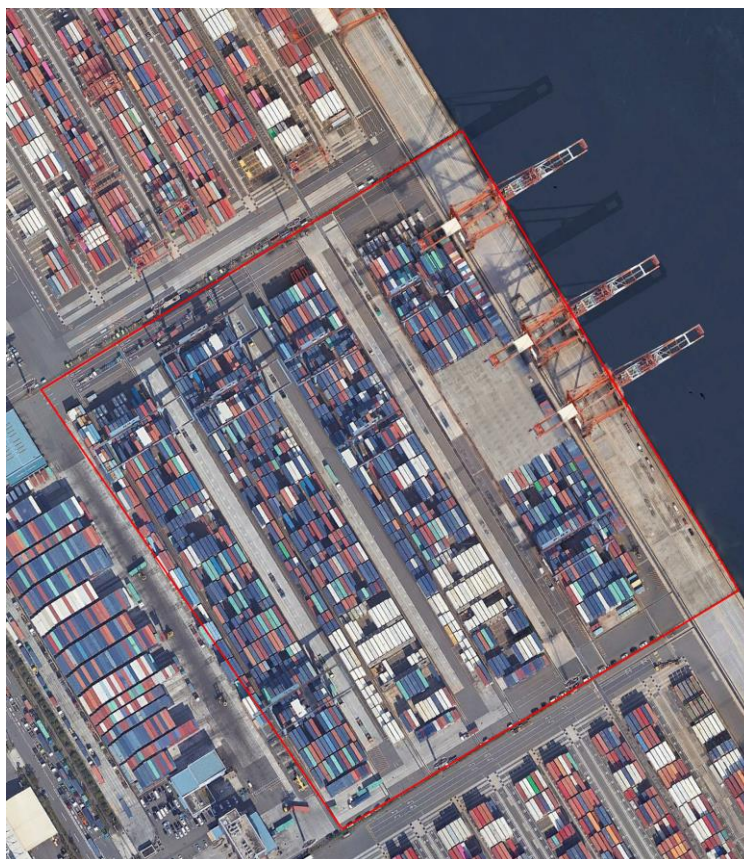


Figura 52. Vista satelital de Oi Container Terminal Berth 5. Fuente: Google Earth.



6.1.2.3.2 Evergreen Kaohsiung Container Terminal (K79-K81)

En primer lugar, se ha de hacer mención que esta terminal inició sus operaciones en 2005, y que posteriormente, y en una fecha que se desconoce, realizó la automatización de los CARMG, pero anterior a 2011 (Cederqvist, 2011).

Terminal	Evergreen Kaohsiung Container Terminal
Localización	Kaohsiung, Taiwan
Operador	Evergreen
Año de apertura	2005
Línea de atraque (m)	860
Grúas STS	9
Almacenamiento	CARMG
ASC por bloque	2
Nº de bloques	15
Nº de grúas de almacenamiento	30
Anchura del bloque	14
Altura de apilado	5
Longitud bloque promedio (m)	300
Longitud bloque promedio (TEUs)	49
Capacidad de almacenamiento (TEUs)	51.450
Vehículo de interconexión	Truck Terminal

De esta terminal se destaca la gran capacidad de almacenamiento estático comparado con la línea de atraque. Esta tiene un orden de magnitud muy parecido a la terminal automatizada de Long Beach, que tiene una línea de 800 metros y una capacidad de almacenamiento de 54.000 TEUs.

También es remarcable la disposición de los atraques, en perpendicular y paralelo a los bloques. También se pueden diferenciar muy claramente los tres atraques existentes, cosa que en otras terminales puede estar más desvirtuado.

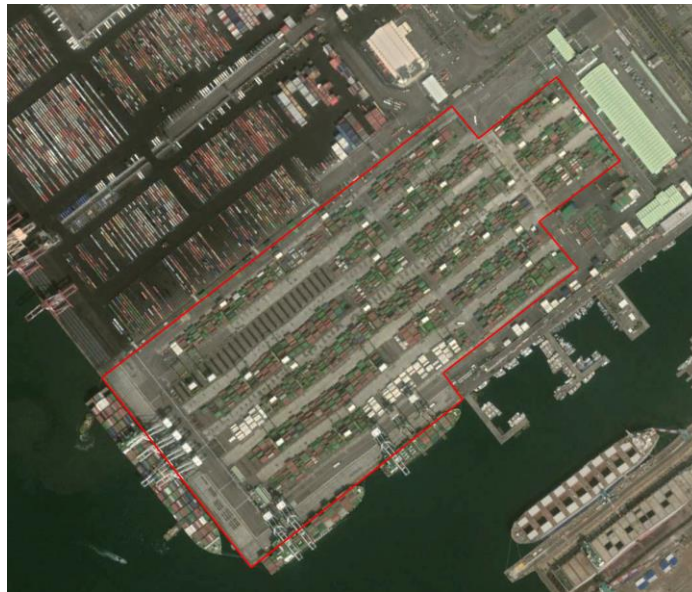


Figura 53. Vista satelital de Evergreen Kaohsiung Container Terminal. Fuente: Google Earth.

6.1.2.3.3 Virginia International Gateway

Esta terminal inició operaciones en 2008, pero realizó una expansión que ha entrado en funcionamiento a finales de 2018 o principios de 2019, casi doblando su capacidad de almacenamiento, y ampliando sensiblemente la línea de atraque. A continuación, se adjuntan los datos de la terminal, así como dos imágenes satelitales, una de mediados de 2018, y otra de julio de 2019.

Terminal	Virginia International Gateway
Localización	Porsmouth, VA, USA
Operador	Virginia International Gateway
Año de apertura	2008
Línea de atraque (m)	1145
Grúas STS	12
Almacenamiento	ARMG
ASC por bloque	2
Nº de bloques	26
Nº de grúas de almacenamiento	52
Anchura del bloque	8
Altura de apilado	5
Longitud bloque promedio (m)	400
Longitud bloque promedio (TEUs)	60
Capacidad de almacenamiento (TEUs)	62.400
Vehículo de interconexión	Staddle Carrier

Como se puede observar en la siguiente imagen, esta terminal al tener los bloques dispuestos en perpendicular al muelle tiene mucho parecido con una automatizada. Aunque se ha de destacar la gran longitud de bloque que tiene la presente terminal, además de usar Staddle Carriers para desacoplar movimientos.



Figura 54. Vista satelital de Virginia International Gateway. Fuente: Google Earth.

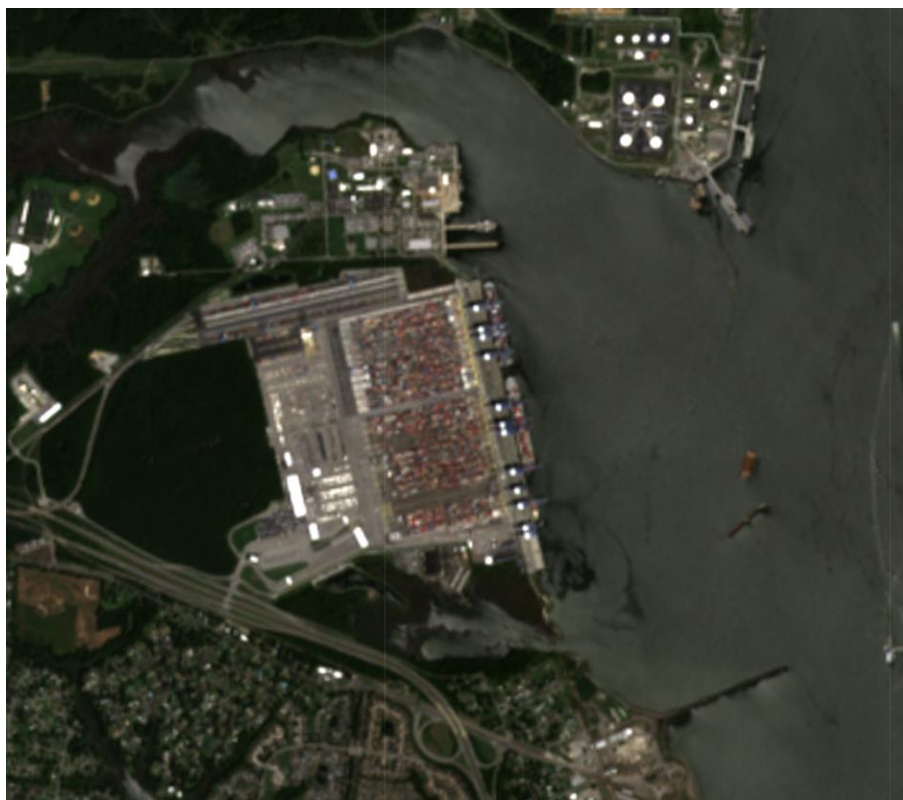


Figura 55. Vista satelital de Virginia International Gateway captada por el satélite Sentinel-2 el 15 de julio de 2019. Fuente: (EOS, n.d.).

6.1.2.3.4 Taipei Port Container Terminal

Esta terminal fue la segunda semiautomatizada de Taiwán, siendo propiedad de un consorcio que une a las principales navieras del país, como son Evergreen, Yang Ming y Wan Hai Lines.

En la siguiente tabla se pueden observar los datos de la presente terminal objeto de estudio.

Terminal	Taipei Port Container Terminal
Localización	Taipei, Taiwán
Operador	Taipei Port Container Terminal Corp.
Año de apertura	2009
Línea de atraque (m)	1370
Grúas STS	13
Almacenamiento	CARMG
ASC por bloque	2
Nº de bloques	19
Nº de grúas de almacenamiento	38
Anchura del bloque	13
Altura de apilado	5
Longitud bloque promedio (m)	282
Longitud bloque promedio (TEUs)	43
Capacidad de almacenamiento (TEUs)	53.105
Vehículo de interconexión	Truck Terminal

Esta terminal, mantiene la tendencia vista en la terminal de Evergreen en Kaohsiung, empleando CARMGs, con una gran anchura de bloque, y empleando camiones de terminal para realizar la interconexión.



Figura 56. Vista satelital de Taipei Port Container Terminal. Fuente: Google Earth.

6.1.2.3.5 Hyundai Pusan New Port Terminal

Esta terminal una de las primeras en iniciar operaciones dentro del entorno del nuevo puerto de Busan, donde de 6 terminales, cinco de ellas son semiautomatizadas.

Terminal	Hyundai Pusan New-Port Terminal
Localización	Busán, Corea del Sur
Operador	Hyundai Merchant Marine & PSA
Año de apertura	2009
Línea de atraque (m)	1150
Grúas STS	12
Almacenamiento	CARMG
ASC por bloque	2
Nº de bloques	19
Nº de grúas de almacenamiento	38
Anchura del bloque	10
Altura de apilado	6
Longitud bloque promedio (m)	335
Longitud bloque promedio (TEUs)	52
Capacidad de almacenamiento (TEUs)	59.280
Vehículo de interconexión	Truck Terminal

De los datos presentados en la anterior tabla, cabe destacar que la longitud de bloque promedio es ligeramente superior a las terminales asiáticas anteriormente vistas, aunque la anchura de bloque es ligeramente inferior a las mismas.

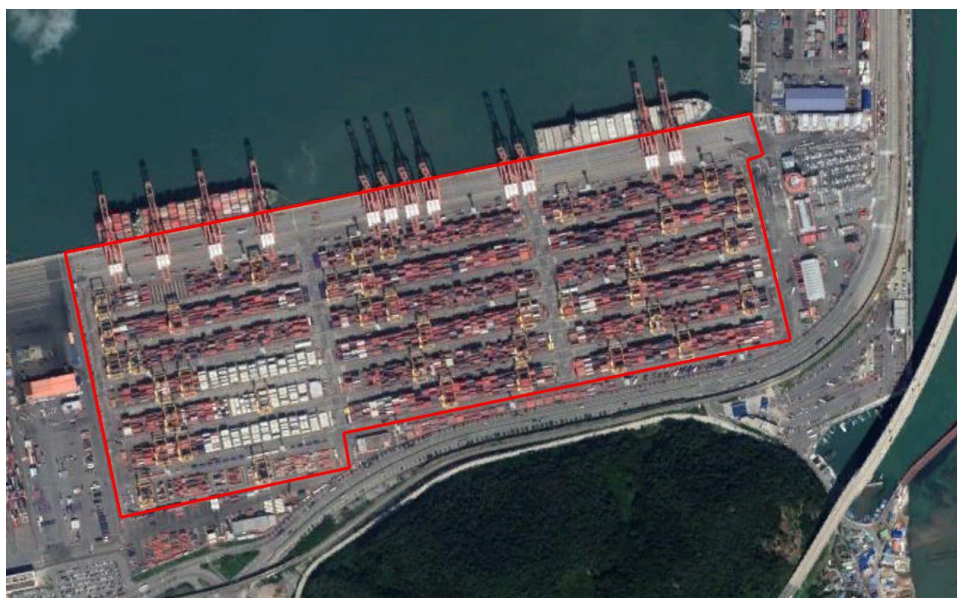


Figura 57. Vista satelital de Hyundai Pusan New-Port Terminal. Fuente: Google Earth.

6.1.2.3.6 Pusan Newport Company

Como se puede observar en la siguiente tabla, esta terminal es la más grande de todas las semiautomatizadas del puerto de Busán, pese a que tiene una anchura de bloque ligeramente inferior a la media, aunque en términos generales se destaca la gran capacidad estática de almacenamiento de la cual dispone.

Terminal	Pusan Newport Company
Localización	Busán, Corea del Sur
Operador	DP World
Año de apertura	2009
Línea de atraque (m)	2000
Grúas STS	21
Almacenamiento	CARMG
ASC por bloque	2
Nº de bloques	35
Nº de grúas de almacenamiento	70
Anchura del bloque	9
Altura de apilado	6
Longitud bloque promedio (m)	314
Longitud bloque promedio (TEUs)	48
Capacidad de almacenamiento (TEUs)	90.720
Vehículo de interconexión	Truck Terminal



Figura 58. Vista satelital de Pusan Newport Company. Fuente: Google Earth.

6.1.2.3.7 Hanjin Busan Newport

Terminal	Hanjin Busan Newport
Localización	Busán, Corea del Sur
Operador	Hanjin Kal & PSA
Año de apertura	2009
Línea de atraque (m)	1100
Grúas STS	12
Almacenamiento	CARMG
ASC por bloque	2
Nº de bloques	21
Nº de grúas de almacenamiento	42
Anchura del bloque	10
Altura de apilado	6
Longitud bloque promedio (m)	316
Longitud bloque promedio (TEUs)	48
Capacidad de almacenamiento (TEUs)	60.480
Vehículo de interconexión	Truck Terminal

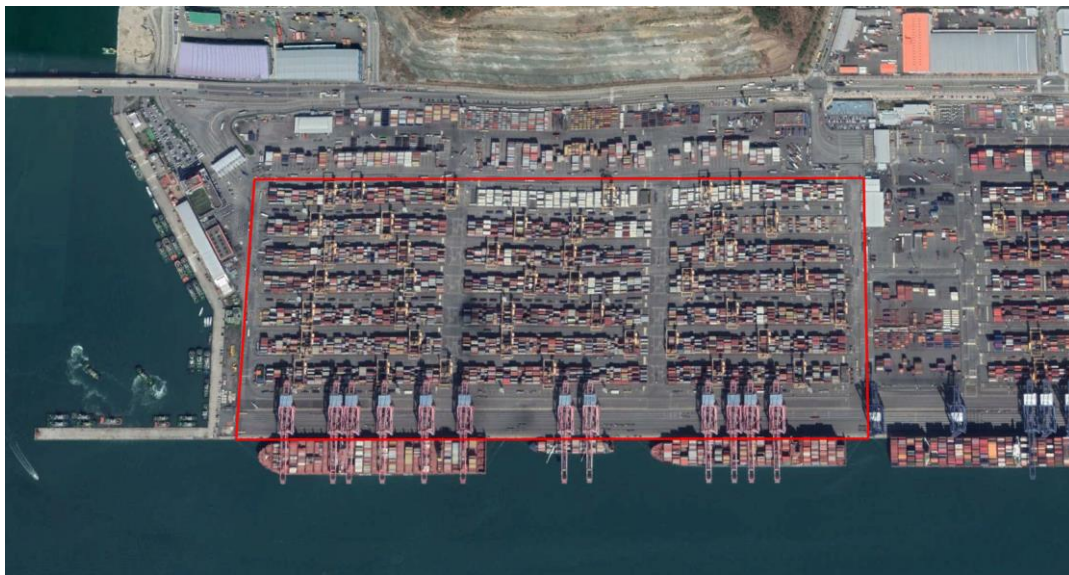


Figura 59. Vista satelital de Hanjin Busan Newport. Fuente: Google Earth.

6.1.2.3.8 Pusan Newport International Terminal

En primer lugar, es destacable que la presente terminal es la gemela de Pusan Newport Company, teniendo la misma anchura de bloque y apilado. Pero no se sigue la misma línea en cuando a la asignación o ratio de CARMGs por bloque, y la longitud del mismo. En la siguiente tabla se pueden observar todos los datos de la terminal.

Terminal	Pusan Newport International Terminal
Localización	Busán, Corea del Sur
Operador	Hyundai Merchant Marine & PSA
Año de apertura	2010
Línea de atraque (m)	1205
Grúas STS	12
Almacenamiento	CARMG
ASC por bloque	2 (3 bloques con 1)
Nº de bloques	21
Nº de grúas de almacenamiento	38
Anchura del bloque	9
Altura de apilado	6
Longitud bloque promedio (m)	326
Longitud bloque promedio (TEUs)	52
Capacidad de almacenamiento (TEUs)	58.968
Vehículo de interconexión	Truck Terminal

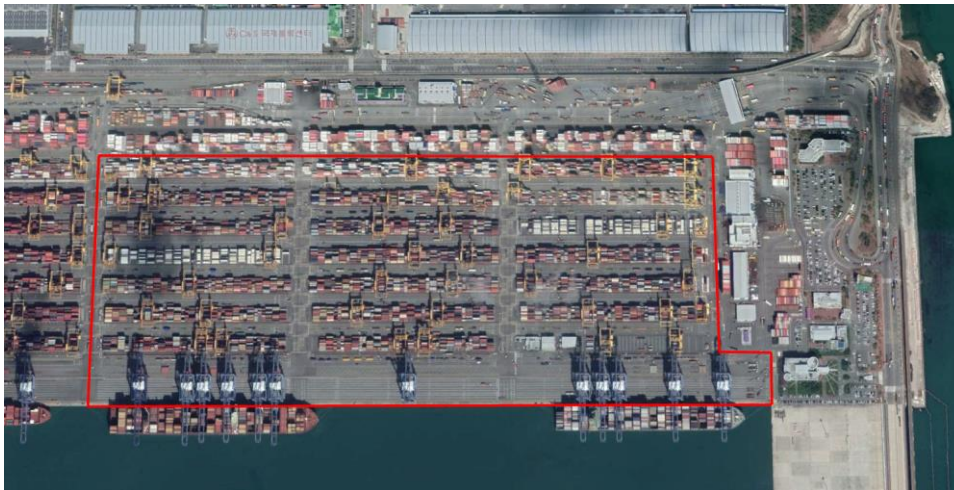


Figura 60. Vista satelital de Pusan Newport International Terminal. Fuente: Google Earth.

6.1.2.3.9 TTI Algeciras

Terminal	TTI Algeciras
Localización	Algeciras, España
Operador	Hyundai Merchant Marine
Año de apertura	2010
Línea de atraque (m)	845
Grúas STS	8
Almacenamiento	ARMG
ASC por bloque	2
Nº de bloques	16
Nº de grúas de almacenamiento	32
Anchura del bloque	8
Altura de apilado	5
Longitud bloque promedio (m)	283
Longitud bloque promedio (TEUs)	46
Capacidad de almacenamiento (TEUs)	29.440
Vehículo de interconexión	Staddle Carrier

Como se puede observar en la tabla anterior, la tipología de los bloques en todos sus tamaños, e incluso en su disposición (perpendicular al muelle), recuerda mucho a una terminal automatizada. Cabe destacar que actualmente está en fase de estudio la ampliación de esta terminal.



Figura 61. Vista satelital de TTI Algeciras. Fuente: Google Earth.

6.1.2.3.10 Kao Ming Container Terminal

La presente terminal, situada justo enfrente de la Evergreen Kaohsiung Container Terminal, teniendo todavía 4 bloques inoperativos, con una asignación de grúas de patio irregular, habiendo un bloque con tres, y el resto con dos.

Terminal	Kao Ming Container Terminal
Localización	Kaohsiung, Taiwan
Operador	Yang Ming
Año de apertura	2011
Línea de atraque (m)	1500
Grúas STS	12
Almacenamiento	CARMG
ASC por bloque	2 y 3
Nº de bloques	18 (14 operativos)
Nº de grúas de almacenamiento	30
Anchura del bloque	14
Altura de apilado	5
Longitud bloque promedio (m)	340
Longitud bloque promedio (TEUs)	50
Capacidad de almacenamiento (TEUs)	49.000
Vehículo de interconexión	Truck Terminal

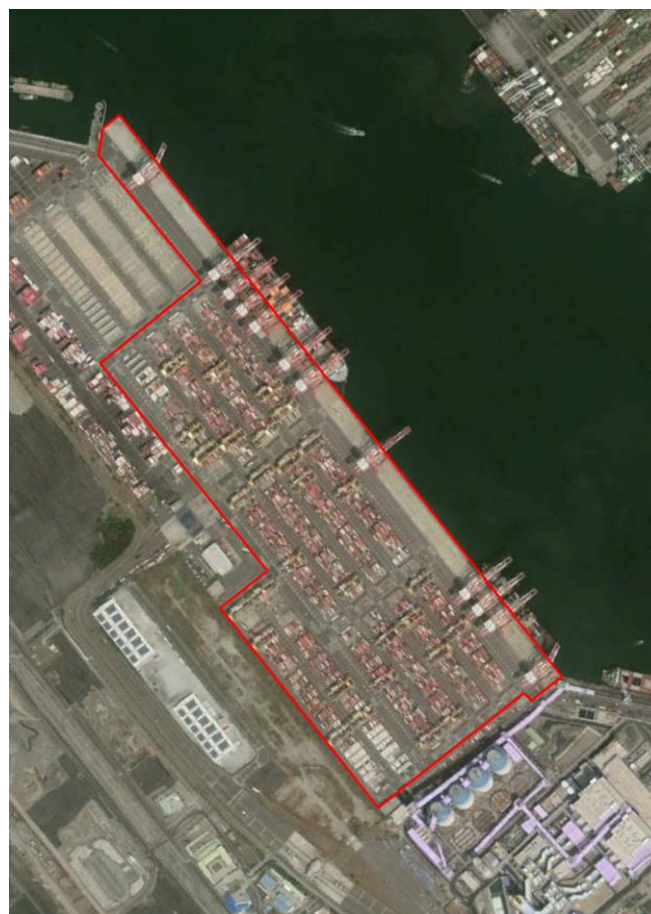


Figura 62. Vista satelital de Kao Ming Container Terminal. Fuente: Google Earth.

6.1.2.3.11 Busan New Container Terminal

La presente terminal fue la última en iniciar operaciones en el puerto de Busán, siendo la única en este entorno portuario en tener los bloques dispuestos en perpendicular al muelle, usando ARMGs, y, además, en usar Staddle Carriers para realizar la interconexión.

Terminal	Busan New Container Terminal
Localización	Busán, Corea del Sur
Operador	BNCT Co. Ltd.
Año de apertura	2011
Línea de atraque (m)	1400
Grúas STS	11
Almacenamiento	ARMG
ASC por bloque	2
Nº de bloques	23 (21 operativos)
Nº de grúas de almacenamiento	42
Anchura del bloque	10
Altura de apilado	5
Longitud bloque promedio (m)	275
Longitud bloque promedio (TEUs)	42
Capacidad de almacenamiento (TEUs)	44.100
Vehículo de interconexión	Staddle Carrier

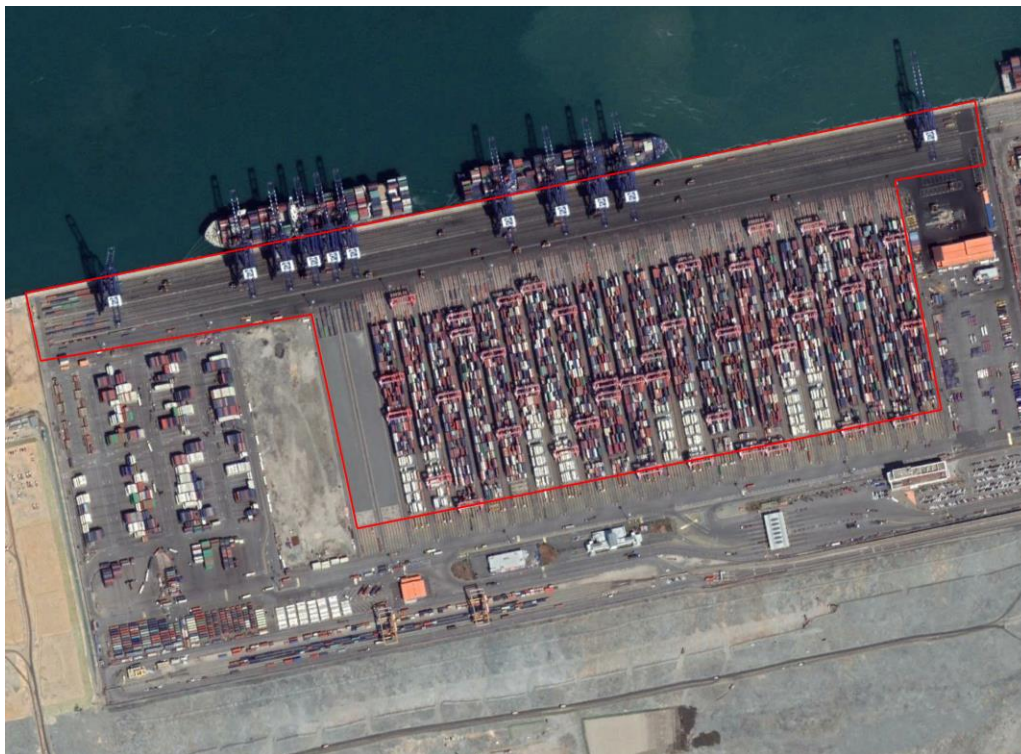


Figura 63. Vista satelital de Busan New Container Terminal. Fuente: Google Earth.

6.1.2.3.12 Khalifa Port Container Terminal

El hecho más destacable de esta terminal es su baja capacidad de apilado, con solo 4 contenedores. También se ha de mencionar que es previsible su expansión, tal y como se observa en la imagen que se adjunta a continuación.

Terminal	Khalifa Port Container Terminal
Localización	Abu Dhabi, EAU
Operador	Abu Dhabi Terminals (ADT)
Año de apertura	2012
Línea de atraque (m)	1600
Grúas STS	12
Almacenamiento	ARMG
ASC por bloque	2
Nº de bloques	26
Nº de grúas de almacenamiento	52
Anchura del bloque	10
Altura de apilado	4
Longitud bloque promedio (m)	259
Longitud bloque promedio (TEUs)	40
Capacidad de almacenamiento (TEUs)	41.600
Vehículo de interconexión	Staddle Carrier



Figura 64. Vista satelital de Khalifa Port Container Terminal. Fuente: Google Earth.

6.1.2.3.13 Barcelona Europe South Terminal (BEST)

Terminal	BEST
Localización	Barcelona, España
Operador	Hutchison Ports
Año de apertura	2012
Línea de atraque (m)	1465
Grúas STS	9
Almacenamiento	ARMG
ASC por bloque	2
Nº de bloques	27
Nº de grúas de almacenamiento	54
Anchura del bloque	9
Altura de apilado	5
Longitud bloque promedio (m)	323
Longitud bloque promedio (TEUs)	50
Capacidad de almacenamiento (TEUs)	60.750
Vehículo de interconexión	Staddle Carrier

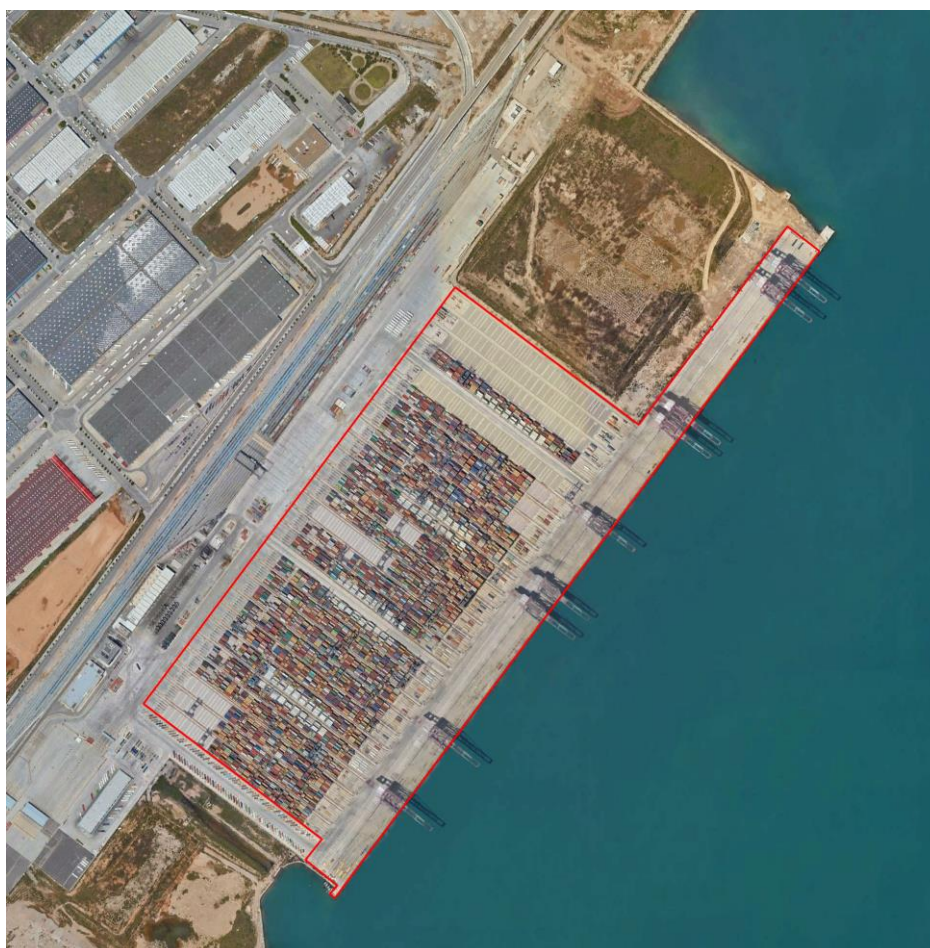


Figura 65. Vista satelital de Barcelona South Europe Terminal. Fuente: Google Earth.

6.1.2.3.14 Jebel Ali Terminal 3

Terminal	Jebel Ali Terminal 3
Localización	Jebel Ali, Dubái, EAU
Operador	DP World
Año de apertura	2014
Línea de atraque (m)	1850
Grúas STS	19
Almacenamiento	CARMG
ASC por bloque	2
Nº de bloques	25
Nº de grúas de almacenamiento	50
Anchura del bloque	9
Altura de apilado	5
Longitud bloque promedio (m)	300
Longitud bloque promedio (TEUs)	46
Capacidad de almacenamiento (TEUs)	51.750
Vehículo de interconexión	Truck Terminal



Figura 66. Imagen satelital de Jebel Ali Terminal 3. Fuente: Google Earth

6.1.2.3.15 Teruk Lamong Terminal

Terminal	Teluk Lamong Terminal
Localización	Surabaya, Indonesia
Operador	Pelindo III (51%) & DP World (49%)
Año de apertura	2014
Línea de atraque (m)	940
Grúas STS	10
Almacenamiento	ARMG
ASC por bloque	2
Nº de bloques	10
Nº de grúas de almacenamiento	20
Anchura del bloque	9
Altura de apilado	5
Longitud bloque promedio (m)	265
Longitud bloque promedio (TEUs)	39
Capacidad de almacenamiento (TEUs)	17.550
Vehículo de interconexión	Truck Terminal

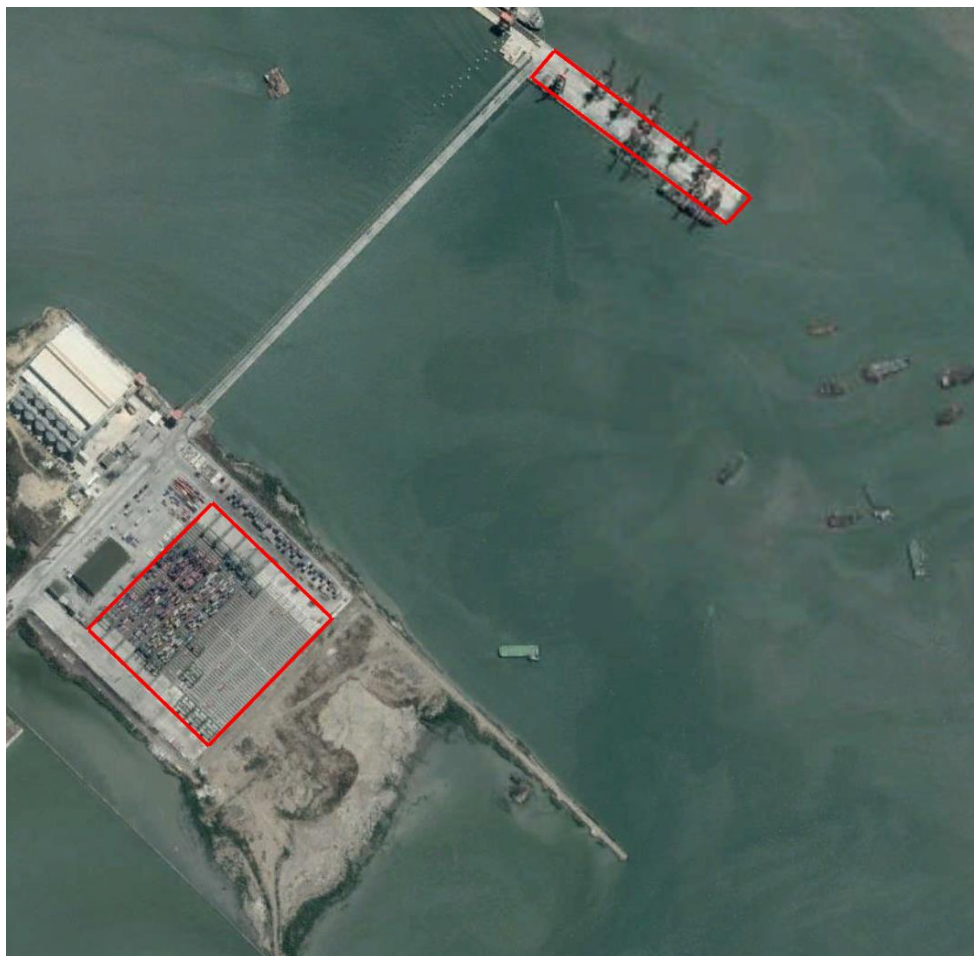


Figura 67. Vista satelital de Teluk Lamong Terminal. Fuente: Google Earth.

6.1.2.3.16 Sydney International Container Terminals

Terminal	Sydney International Container Terminals (SICTL)
Localización	Sydney, Australia
Operador	Hutchison Ports
Año de apertura	2014
Línea de atraque (m)	655
Grúas STS	17550
Almacenamiento	ARMG
ASC por bloque	2
Nº de bloques	10
Nº de grúas de almacenamiento	20
Anchura del bloque	9
Altura de apilado	5
Longitud bloque promedio (m)	235
Longitud bloque promedio (TEUs)	36
Capacidad de almacenamiento (TEUs)	16.200
Vehículo de interconexión	Shuttle Carrier

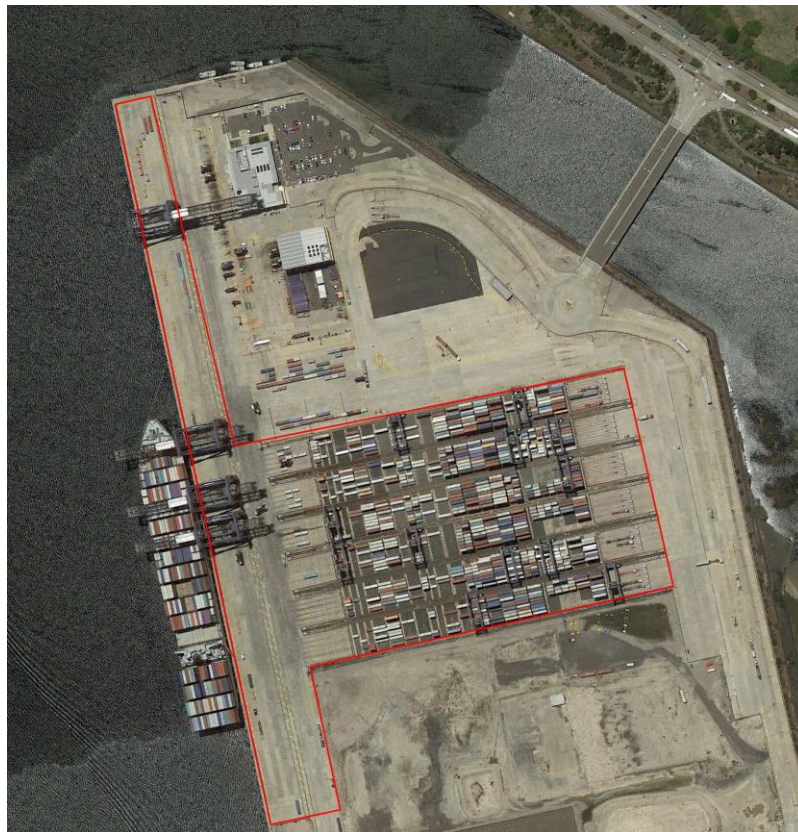


Figura 68. Vista satelital de Sydney International Container Terminals. Fuente: Google Earth.

6.1.2.3.17 Brisbane Container Terminals

Terminal	Brisbane Container Terminals
Localización	Brisbane, Australia
Operador	Hutchison Ports
Año de apertura	2014
Línea de atraque (m)	360
Grúas STS	4
Almacenamiento	ARMG
ASC por bloque	2
Nº de bloques	3
Nº de grúas de almacenamiento	6
Anchura del bloque	9
Altura de apilado	5
Longitud bloque promedio (m)	200
Longitud bloque promedio (TEUs)	30
Capacidad de almacenamiento (TEUs)	4.050
Vehículo de interconexión	Shuttle Carrier

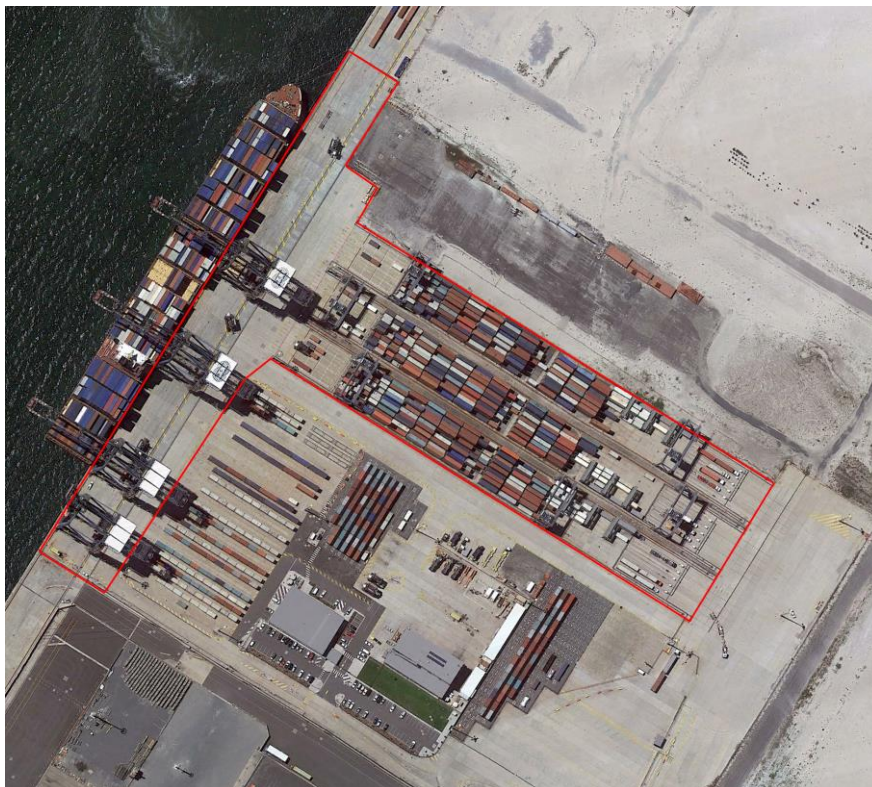


Figura 69. Vista satelital de Brisbane Container Terminals. Fuente: Google Earth.

6.1.2.3.18 DP World Australia's Brisbane Terminal

Terminal	DP World Australia's Brisbane Terminal
Localización	Brisbane, Australia
Operador	DP World
Año de apertura	2014
Línea de atraque (m)	350
Grúas STS	3
Almacenamiento	ARMG
ASC por bloque	2
Nº de bloques	8
Nº de grúas de almacenamiento	16
Anchura del bloque	9
Altura de apilado	5
Longitud bloque promedio (m)	200
Longitud bloque promedio (TEUs)	31
Capacidad de almacenamiento (TEUs)	11.160
Vehículo de interconexión	Shuttle Carrier

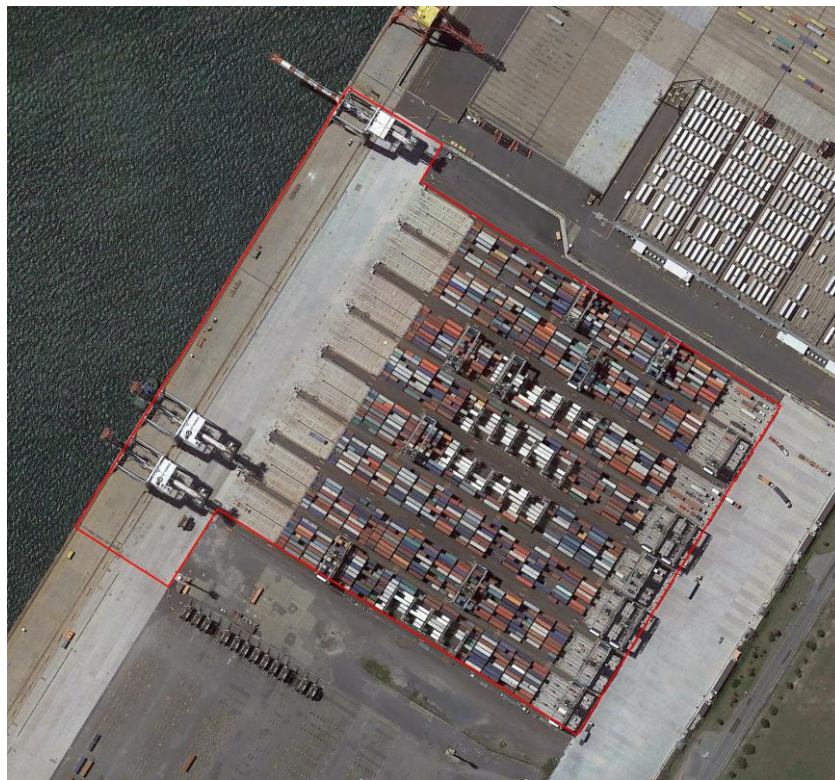


Figura 70. Vista satelital de DP World Australia's Brisbane Terminal. Fuente: Google Earth.

6.1.2.3.19 London Gateway

Terminal	London Gateway
Localización	Londres, Reino Unido
Operador	DP World
Año de apertura	2014
Línea de atraque (m)	1250
Grúas STS	12
Almacenamiento	ARMG
ASC por bloque	2
Nº de bloques	30
Nº de grúas de almacenamiento	60
Anchura del bloque	10
Altura de apilado	5
Longitud bloque promedio (m)	243
Longitud bloque promedio (TEUs)	36
Capacidad de almacenamiento (TEUs)	54.000
Vehículo de interconexión	Shuttle Carrier

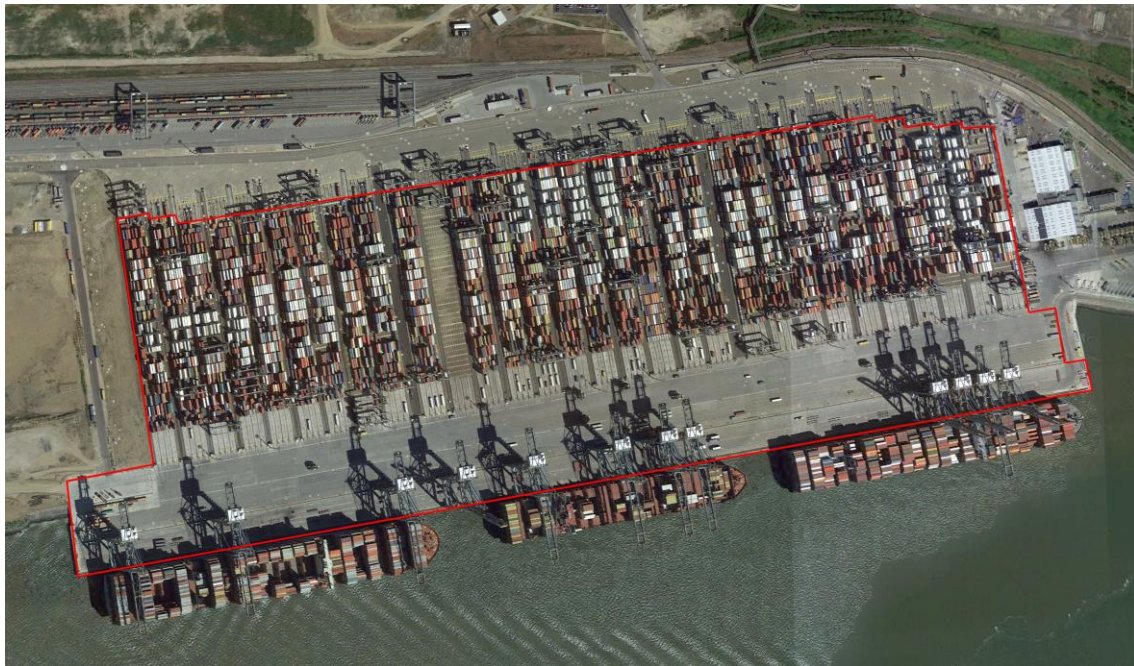


Figura 71. Vista satelital de London Gateway. Fuente: Google Earth.

6.1.2.3.20 Pasir Panjang Terminals 4-6

Terminal	Pasir Panjang Terminals 4, 5 & 6
Localización	Singapur
Operador	COSCO-PSA (4,6), CMA CGM-PSA (5)
Año de apertura	2015
Línea de atraque (m)	5660
Grúas STS	61
Almacenamiento	CARMG
ASC por bloque	2
Nº de bloques	93
Nº de grúas de almacenamiento	186
Anchura del bloque	10
Altura de apilado	5
Longitud bloque promedio (m)	250
Longitud bloque promedio (TEUs)	37
Capacidad de almacenamiento (TEUs)	172.050
Vehículo de interconexión	Truck Terminal

Como se puede apreciar, tanto en la tabla anterior, como en la imagen siguiente, esta terminal tiene una gran extensión. De hecho, fue inaugurada por fases, iniciándose el servicio en 2015 con la terminal 4.

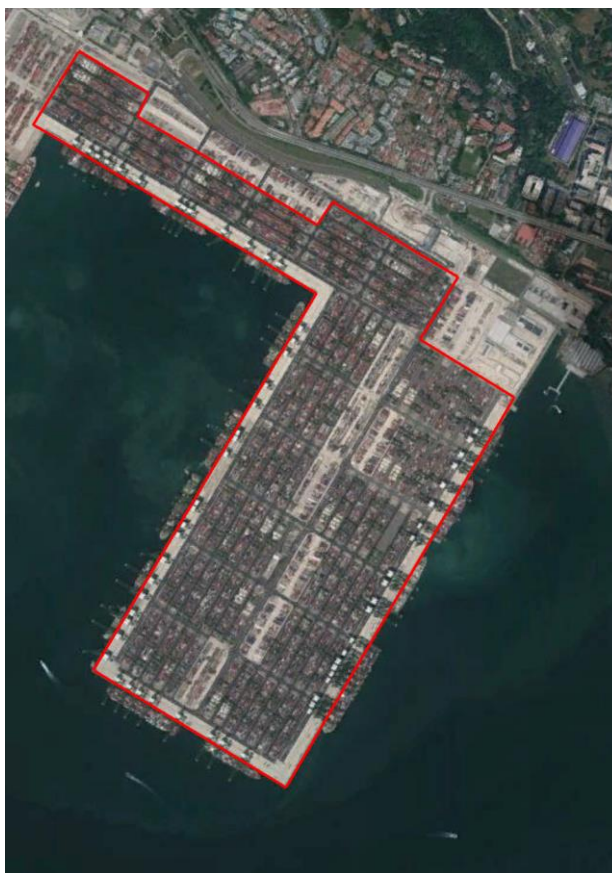


Figura 72. Pasir Panjang Terminals 4-6. Fuente: Google Earth.

6.1.2.3.21 Sunkwang Newport Container Terminal

Terminal	Sunkwang Newport Container Terminal
Localización	Incheon, Corea del Sur
Operador	Sunk Wang
Año de apertura	2015
Línea de atraque (m)	800
Grúas STS	7
Almacenamiento	CARMG
ASC por bloque	2
Nº de bloques	14
Nº de grúas de almacenamiento	28
Anchura del bloque	7
Altura de apilado	5
Longitud bloque promedio (m)	331
Longitud bloque promedio (TEUs)	50
Capacidad de almacenamiento (TEUs)	24.500
Vehículo de interconexión	Truck Terminal

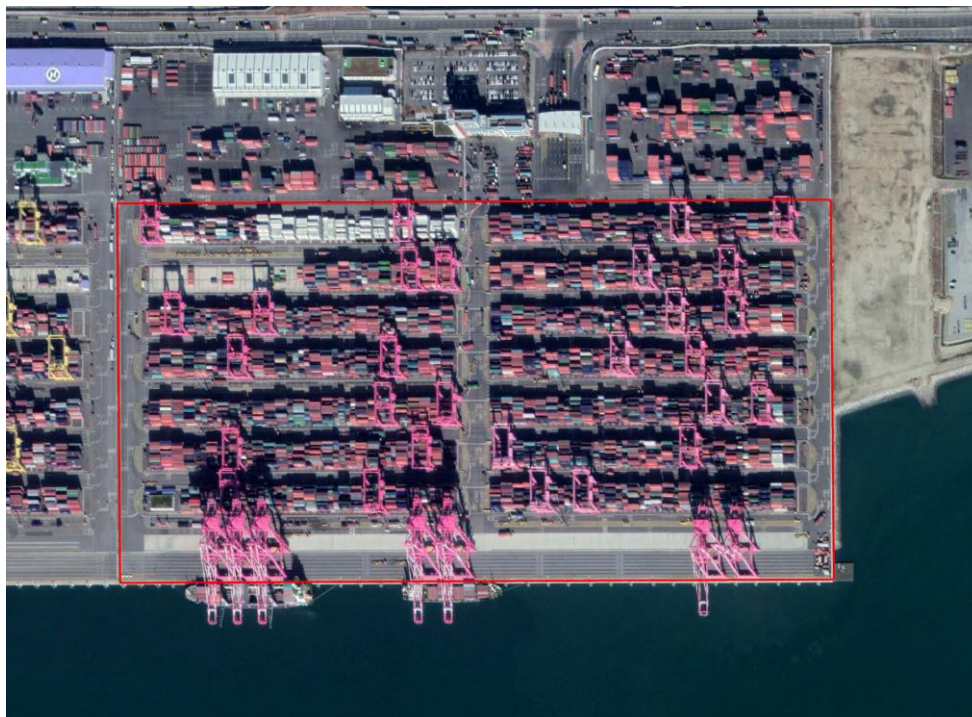


Figura 73. Vista satelital de Sunkwang Newport Container Terminal. Fuente: Google Earth.

6.1.2.3.22 Keelung West Coast Container Terminal: North Container Yard

Terminal	West Coast Container Terminal: North Container Yard
Localización	Keelung, Taiwán
Operador	PORT OF KEELUNG, TAIWAN INTERNATIONAL PORTS CORPORATION, LTD.
Año de apertura	2016
Línea de atraque (m)	1105
Grúas STS	7
Almacenamiento	CARMG
ASC por bloque	2
Nº de bloques	2
Nº de grúas de almacenamiento	4
Anchura del bloque	14
Altura de apilado	5
Longitud bloque promedio (m)	175
Longitud bloque promedio (TEUs)	24,5
Capacidad de almacenamiento (TEUs)	3.430
Vehículo de interconexión	Staddle Carrier

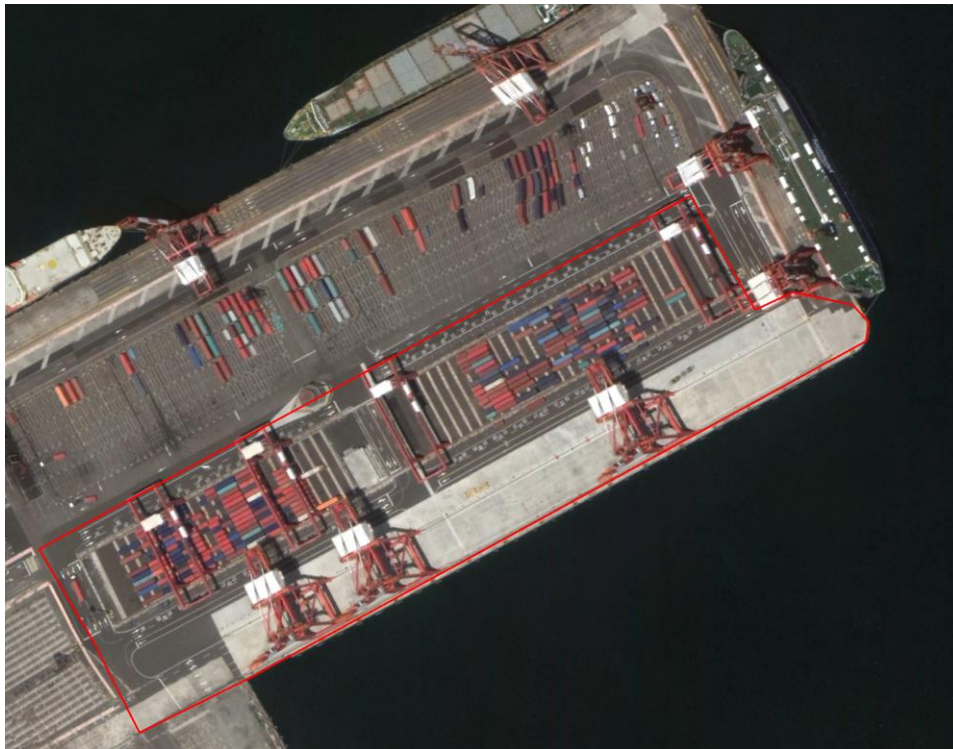


Figura 74. Vista satelital de Keelung West Coast Container Terminal: North Container Yard. Fuente: Google Earth.

6.1.2.3.23 Hanjin Incheon Container Terminal

Terminal	Hanjin Incheon Container Terminal
Localización	Incheon, Corea del Sur
Operador	Hanjin Kal
Año de apertura	2016
Línea de atraque (m)	800
Grúas STS	7
Almacenamiento	CARMG
ASC por bloque	2
Nº de bloques	14
Nº de grúas de almacenamiento	28
Anchura del bloque	7
Altura de apilado	5
Longitud bloque promedio (m)	331
Longitud bloque promedio (TEUs)	50
Capacidad de almacenamiento (TEUs)	24.500
Vehículo de interconexión	Truck Terminal



Figura 75. Vista satelital de Hanjin Incheon Container Terminal. Fuente: Google Earth.

6.1.2.3.24 Tuxpan Port Terminal

El caso de esta terminal es muy curioso, ya que, pese a tener el subsistema de almacenamiento automatizado, no solo maneja contenedores, sino que es una terminal multipropósito, manejando también carga general y carga rodada, en especial, vehículos de stock.

Terminal	Tuxpan Port Terminal
Localización	Tuxpán, México
Operador	Carrix y SSA Marine
Año de apertura	2016
Línea de atraque (m)	560
Grúas STS	4
Almacenamiento	CARMG
ASC por bloque	1
Nº de bloques	8
Nº de grúas de almacenamiento	8
Anchura del bloque	12
Altura de apilado	5
Longitud bloque promedio (m)	210
Longitud bloque promedio (TEUs)	32
Capacidad de almacenamiento (TEUs)	15.360
Vehículo de interconexión	Truck Terminal



Figura 76. Vista satelital de Tuxpan Port Terminal. Fuente: Google Earth.

6.1.2.3.25 Kaohsiung Berth 120

Esta terminal es la única semiautomatizada en el puerto de Kaohsiung que tiene carácter público. En un principio, el atraque 121, anexo a la presente terminal iba a ser operado por la naviera japonesa NYK (Taiwan Port Group, 2018), pero retiró su inversión, quedando bloques vacíos, como se puede observar en la siguiente imagen.

Terminal	Kaohsiung Berth 120
Localización	Kaohsiung, Taiwán
Operador	PORT OF KAOHSIUNG, TAIWAN INTERNATIONAL PORTS CORPORATION, LTD.
Año de apertura	2017
Línea de atraque (m)	610
Grúas STS	4
Almacenamiento	CARMG
ASC por bloque	2
Nº de bloques	3
Nº de grúas de almacenamiento	6
Anchura del bloque	14
Altura de apilado	5
Longitud bloque promedio (m)	210
Longitud bloque promedio (TEUs)	32
Capacidad de almacenamiento (TEUs)	6.720
Vehículo de interconexión	Truck Terminal

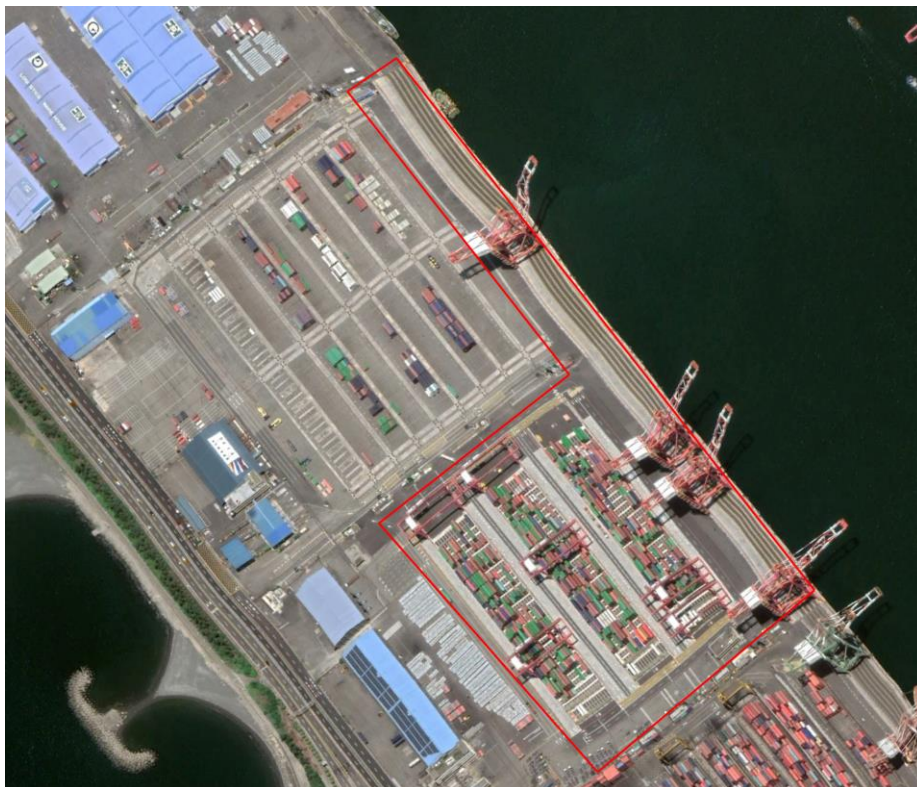


Figura 77. Kaohsiung Berth 120. Fuente: Google Earth.

6.1.2.3.26 Liverpool2

Terminal	Liverpool2
Localización	Liverpool, Reino Unido
Operador	Peel Ports
Año de apertura	2017
Línea de atraque (m)	830
Grúas STS	5
Almacenamiento	CARMG
ASC por bloque	2
Nº de bloques	6
Nº de grúas de almacenamiento	12
Anchura del bloque	13
Altura de apilado	6
Longitud bloque promedio (m)	212
Longitud bloque promedio (TEUs)	32
Capacidad de almacenamiento (TEUs)	14.976
Vehículo de interconexión	Truck Terminal

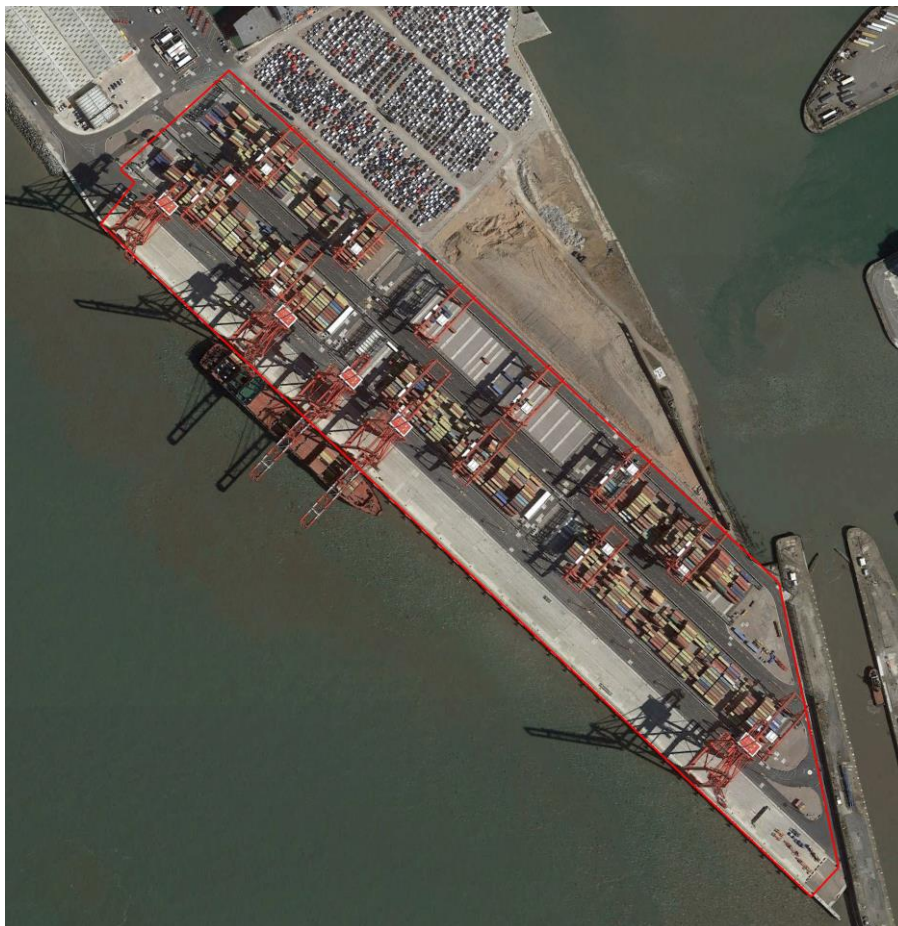


Figura 78. Vista satelital de Liverpool2. Fuente: Google Earth.

6.1.2.3.27 APM Terminals Lázaro Cárdenas

Terminal	Lázaro Cardenas
Localización	Lázaro Cardenas, México
Operador	APM Terminals
Año de apertura	2017
Línea de atraque (m)	755
Grúas STS	7
Almacenamiento	ARMG
ASC por bloque	2
Nº de bloques	11
Nº de grúas de almacenamiento	22
Anchura del bloque	9
Altura de apilado	5
Longitud bloque promedio (m)	295
Longitud bloque promedio (TEUs)	45
Capacidad de almacenamiento (TEUs)	22.275
Vehículo de interconexión	Staddle Carrier

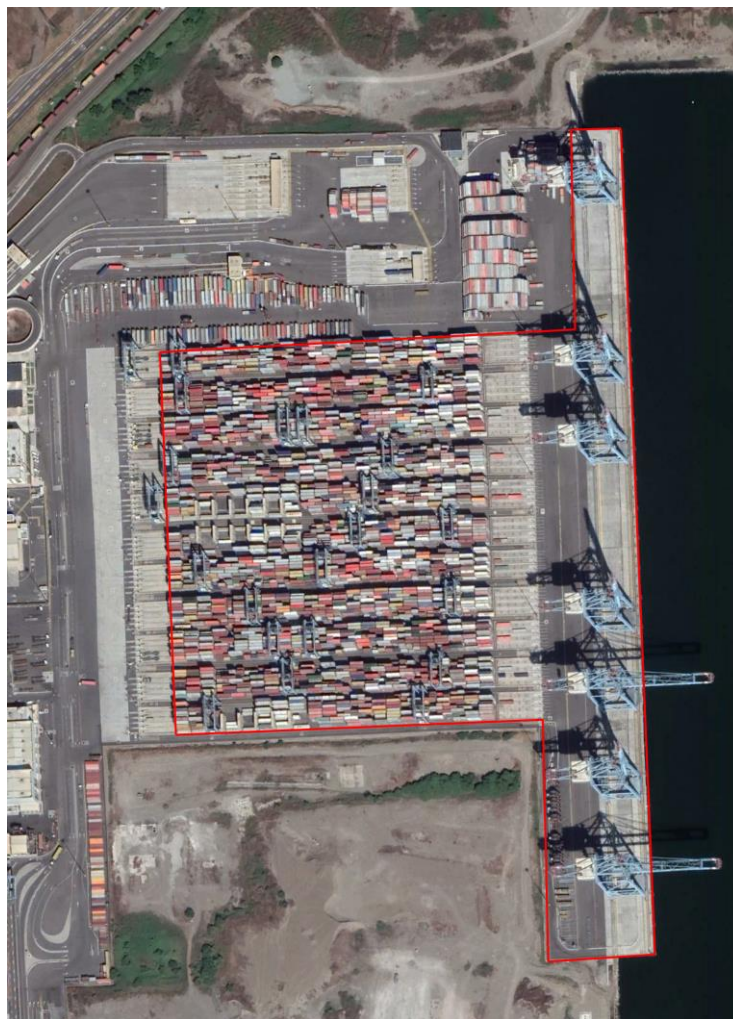


Figura 79. Vista satelital de APM Terminals Lázaro Cárdenas. Fuente: Google Earth.

6.1.2.3.28 Tánger Med II

De esta terminal se han de destacar dos aspectos. La primera de ellas es que pese a tener los bloques paralelos al muelle, la carga y descarga de vehículos se realizan en sendos buffers situados en los extremos de cada bloque. Además, no solo se tiene automatizado el almacenamiento, sino que las grúas STS se manejan en remoto.

Terminal	Tánger Med II
Localización	Tánger, Marruecos
Operador	APM Terminals
Año de apertura	2019
Línea de atraque (m)	1200
Grúas STS	12
Almacenamiento	ARMG
ASC por bloque	2
Nº de bloques	21
Nº de grúas de almacenamiento	42
Anchura del bloque	11
Altura de apilado	5
Longitud bloque promedio (m)	266
Longitud bloque promedio (TEUs)	39
Capacidad de almacenamiento (TEUs)	52.899
Vehículo de interconexión	Shuttle Carrier

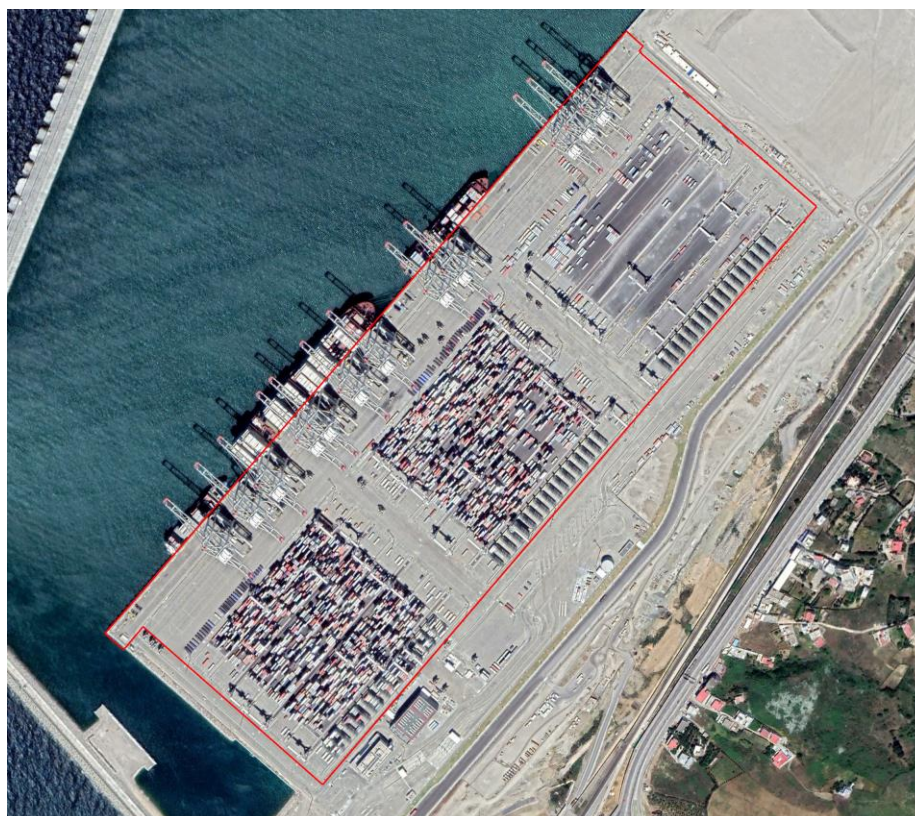


Figura 80. Vista satelital de Tánger Med II. Fuente: Google Earth.



6.1.2.4 Terminales semiautomatizadas con el subsistema de almacenamiento parcialmente automatizado

6.1.2.4.1 Antwerp Gateway

La presente terminal combina una parte del subsistema de almacenamiento automatizada, basada en ARMGs, y el resto de la terminal con almacenamiento basado en Staddle Carriers convencionales, que se usan también como vehículo de interconexión con la parte automatizada. Además, viendo la evolución que ha seguido la terminal, no parece que vaya a automatizar el resto, ya que se trata de un desarrollo bastante reciente. A continuación, se adjunta, tanto los datos más relevantes de la terminal, como una vista satelital de la misma.

Terminal	Antwerp Gateway
Localización	Ámberes, Bélgica
Operador	DP World
Año de apertura	2007
Línea de atraque (m)	1660
Grúas STS	11
Almacenamiento	ARMG
ASC por bloque	2
Nº de bloques	10
Nº de grúas de almacenamiento	20
Anchura del bloque	9
Altura de apilado	5
Longitud bloque promedio (m)	256
Longitud bloque promedio (TEUs)	41
Capacidad de almacenamiento (TEUs)	18.450
Vehículo de interconexión	Staddle Carrier

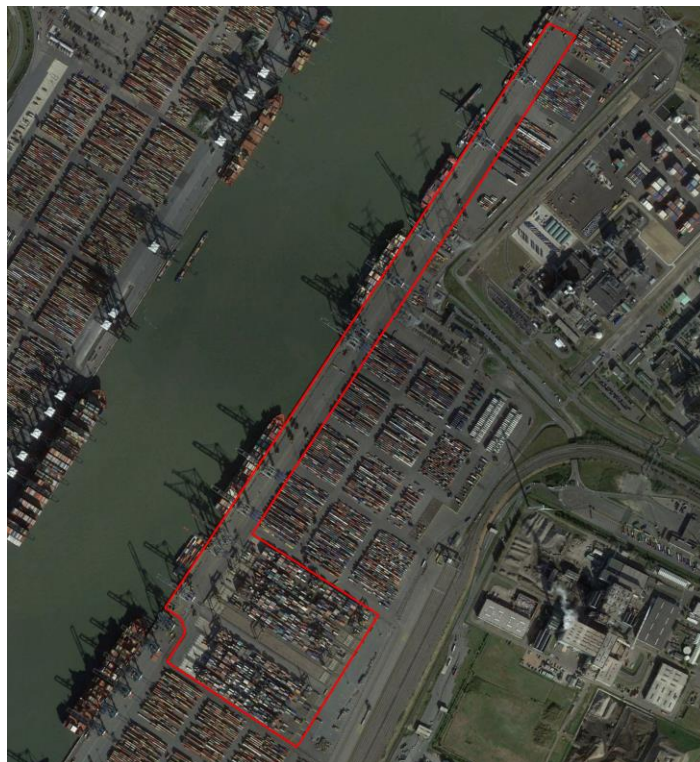


Figura 81. Vista satelital de Antwerp Gateway. Fuente: Google Earth.

6.1.2.4.2 GCT Bayonne

En primer lugar, no se ha podido determinar con exactitud en que año inició operaciones la presente terminal, pero es anterior a 1995. En cuanto a los bloques que tiene automatizados en la actualidad, estos entraron en funcionamiento en 2014.

Resulta curioso que se dispongan los bloques de forma oblicua respecto al muelle, siendo la única terminal en el mundo con esta disposición, pero si se examina en detalle resulta muy adecuado para esta, dado las limitaciones que impone su forma y tamaño.

Terminal	GCT Bayonne
Localización	Bayonne, NJ, USA
Operador	Global Container Terminals
Año de apertura	-
Línea de atraque (m)	820
Grúas STS	6
Almacenamiento	ARMG
ASC por bloque	2
Nº de bloques	10
Nº de grúas de almacenamiento	20
Anchura del bloque	9
Altura de apilado	5
Longitud bloque promedio (m)	240
Longitud bloque promedio (TEUs)	35
Capacidad de almacenamiento (TEUs)	16.200
Vehículo de interconexión	Staddle Carrier

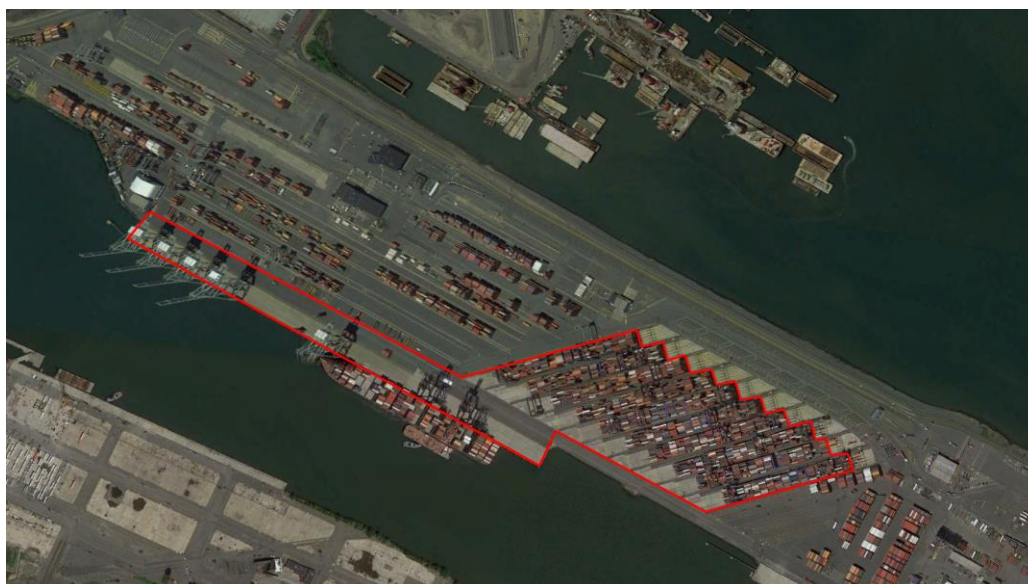


Figura 82. Vista satelital de GCT Bayonne. Fuente: Google Earth.

6.1.2.4.3 Norfolk International Terminals South

La presente terminal ha puesto en marcha parte de la automatización del subsistema de almacenamiento durante la primera parte del año, no habiéndose encontrado imágenes satelitales que permitiesen un análisis detallado. Por ello, se ha recurrido a una imagen colgada en la página web de la terminal para poder obtener los datos.



Figura 83. Imagen de la parte automatizada de Norfolk International Terminals South. Fuente: (The Port of Virginia, 2019).

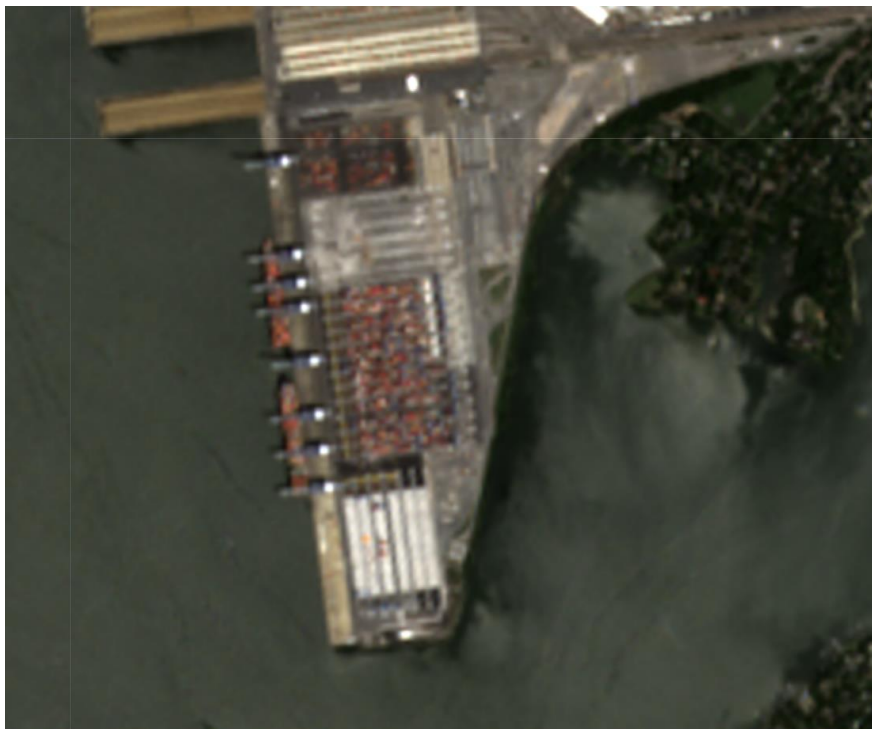


Figura 84. Imagen captada por el satélite Sentinel-2 el 15 de julio de 2019. Fuente: (EOS, n.d.)



Terminal	Norfolk International Terminals South
Localización	Norfolk, VA, USA
Operador	Norfolk International Terminals
Año de apertura	-
Línea de atraque (m)	850
Grúas STS	8
Almacenamiento	ARMG
ASC por bloque	2
Nº de bloques	12
Nº de grúas de almacenamiento	24
Anchura del bloque	9
Altura de apilado	5
Longitud bloque promedio (m)	254 (Incierto)
Longitud bloque promedio (TEUs)	34
Capacidad de almacenamiento (TEUs)	18.360
Vehículo de interconexión	Staddle Carrier

6.1.2.4.4 HHLA Terminal Burchardkai

Esta terminal empezó su andadura con la automatización en el año 2007, faltando aproximadamente un 50% por automatizar. Además, se le une la dificultad de que esta terminal tiene tres líneas de atraque no contiguas. Esto hace, que los bloques actualmente automatizados, solo sirvan a una de estas líneas de atraque. Se ha de destacar que esta es la única terminal que tiene el TRMG, tres grúas pórtico sobre raíles en cada bloque pasantes, aunque esto le limita la altura de apilado a cuatro contenedores.

Terminal	HHLA Terminal Burchardkai
Localización	Hamburgo, Alemania
Operador	HHLA
Año de apertura	-
Línea de atraque (m)	850
Grúas STS	18360
Almacenamiento	TRMG
ASC por bloque	3
Nº de bloques	12
Nº de grúas de almacenamiento	36
Anchura del bloque	10
Altura de apilado	4
Longitud bloque promedio (m)	290
Longitud bloque promedio (TEUs)	42
Capacidad de almacenamiento (TEUs)	20.160
Vehículo de interconexión	Staddle Carrier

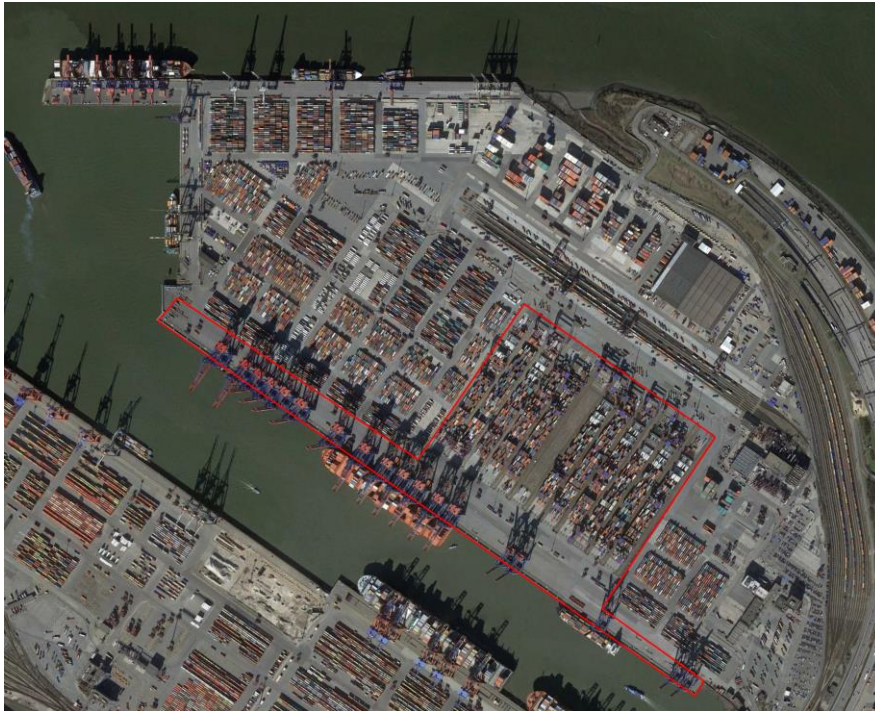


Figura 85. Vista satelital de HHLA CTB. Fuente: Google Earth.

6.1.2.4.5 Manzanillo International Terminal

La presente terminal, operada por Carrix y SSA Marine, únicamente tiene una mínima parte automatizada (3 bloques), no habiendo constancia de que se persiga la automatización del resto de la terminal. Es por ello, que no se incluyen datos técnicos en este apartado.

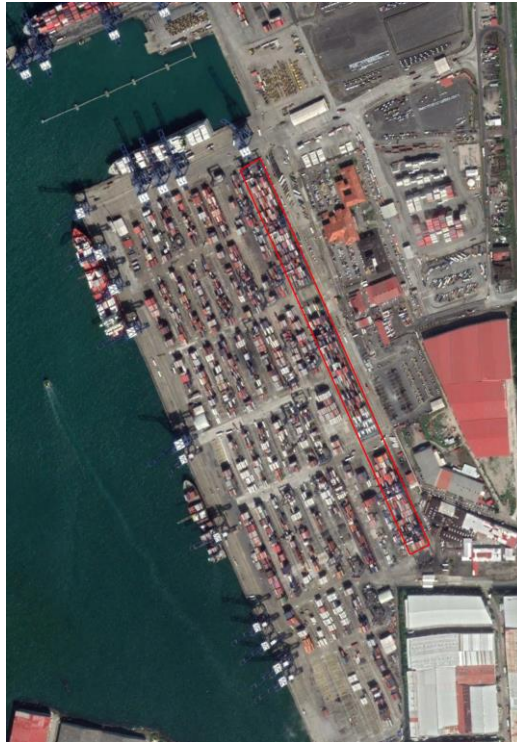


Figura 86. Vista satelital de Manzanillo International Terminal. Fuente: Google Earth.

6.1.2.4.6 Xiamen Ocean Gate Container Terminal

La presente terminal es la única en este apartado que tiene parte del almacenamiento, y la interconexión basada en AGVs, aunque es una parte insignificante respecto el total de la terminal, y dado que no se tiene constancia de que se vaya a extender al resto de la terminal, se ha decidido no recabar más datos.

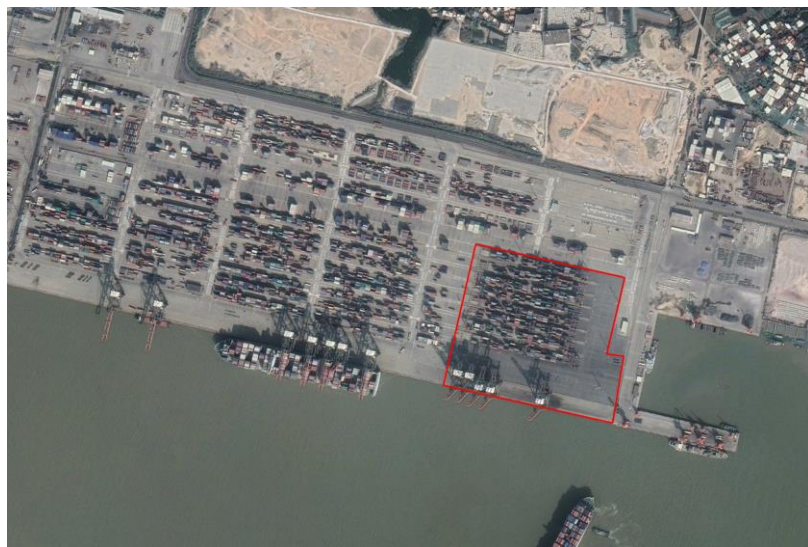


Figura 87. Vista satelital de Xiamen Ocean Gate Container Terminal. Fuente: Google Earth.



6.1.2.5 Estadísticas de las terminales semiautomatizadas

En el presente apartado se van a realizar una agregación de los datos anteriormente obtenidos, para poder extraer algunas conclusiones a nivel global, siguiendo la línea del apartado con el mismo nombre en el epígrafe de automatizadas. Se ha de mencionar que solo se va a trabajar con las terminales cuya semiautomatización esté completada, es decir las terminales incluidas dentro de los apartados 5.1.2.1 al 5.1.2.3.

En primer lugar, si se comparan las distintas disposiciones de los bloques respecto a la línea de atraque principal, se observa como la ganadora es una disposición paralela a esta, con un 60%.

Dentro de esta disposición, la grúa pórtico con mayor implantación es el CARMG, con un 83% (15 terminales de 18), mientras que en las terminales sucede todo lo contrario, siendo el ARMG la más usada con un 91% (11 de 12 terminales).

A continuación, se adjuntan las estadísticas de las terminales semiautomatizadas con almacenamiento basado en ARMGs/CARMGs, con bloques paralelos al muelle.

	Promedio	Desviación típica
Línea de atraque (m)	1.410	1.214
Nº bloques	20,8	22,8
Anchura bloque (contenedores)	11,3	2,6
Altura de apilado	5,3	0,4
ASC por bloque	2,0	0,0
Longitud bloque promedio (m)	282	49
Longitud bloque promedio (TEUs)	42,9	8,0
Grúas STS	13,4	13,6
Capacidad de almacenamiento (TEUs)	48.260	40.566
Densidad de almacenamiento (TEUs/Ha)	1039	282
Relación capacidad almacenamiento/STS	3669	1313

Figura 88. Estadísticas de las terminales semiautomatizadas con almacenamiento basado en ARMGs/CARMGs con bloques paralelos al muelle.

De lo anterior se pueden destacar varios aspectos. En primer lugar, se destaca la gran coincidencia de grúas de almacenamiento por bloque, altura de apilado y anchura, además de una relativa baja dispersión en cuanto a la longitud de bloque.

Por otro lado, se ha de mencionar un dato que resulta interesante, relativo a la densidad de almacenamiento, donde hay una baja dispersión de los datos.



Resulta de interés que las terminales con menor superficie, por lo general tienen una menor densidad de apilado.

En la siguiente tabla, se pueden observar las estadísticas de las terminales semiautomatizadas con almacenamiento basado en ARMGs con bloques perpendiculares al muelle.

	Promedio	Desviación típica
Línea de atraque (m)	928	412
Nº bloques	16,3	9,2
Anchura bloque (contenedores)	9,3	1,1
Altura de apilado	5,0	0,4
ASC por bloque	1,9	0,3
Longitud bloque promedio (m)	270	60
Longitud bloque promedio (TEUs)	41,4	9,3
Grúas STS	8,1	3,6
Capacidad de almacenamiento (TEUs)	32.813	21.528
Densidad de almacenamiento (TEUs/	1177	242
Relación capacidad almacenamiento/	3839	1505

Figura 89. Estadísticas de las terminales semiautomatizadas con almacenamiento basado en ARMGs con bloques perpendiculares al muelle.

Por lo general, y haciendo una comparación con la anterior tabla de terminales con bloques paralelos al muelle, se tiene un tamaño de terminal media menor, aunque con una menor dispersión en todas las variables. Es destacable que la densidad de apilado sea ligeramente superior, mientras la dispersión es menor.



6.1.2.5.1 Estadísticas de terminales semiautomatizadas a nivel regional

A continuación, se adjuntan las tablas con los datos desagregados por continente, con la excepción de África, debido a que contaba con solo una terminal.

Asia	Promedio	Desviación típica
Línea de atraque (m)	1.428	1.173
Nº bloques	21,4	21,8
Anchura bloque (contenedores)	10,8	2,6
Altura de apilado	5,2	0,5
ASC por bloque	2,0	0,0
Longitud bloque promedio (m)	287	46
Longitud bloque promedio (TEUs)	43,9	7,6
Grúas STS	13,6	13,0
Capacidad de almacenamiento (TEUs)	48.377	39.256
Densidad de almacenamiento (TEUs/Ha)	1.045	298
Relación capacidad almacenamiento/STS	3.614	1.370

Europa	Promedio	Desviación típica
Línea de atraque (m)	1.098	313
Nº bloques	19,8	11,0
Anchura bloque (contenedores)	10,0	2,2
Altura de apilado	5,3	0,5
ASC por bloque	2,0	0,0
Longitud bloque promedio (m)	265	48
Longitud bloque promedio (TEUs)	41,0	8,4
Grúas STS	8,5	2,9
Capacidad de almacenamiento (TEUs)	39.792	21.324
Densidad de almacenamiento (TEUs/Ha)	1.184	37
Relación capacidad almacenamiento/STS	4.481	1.633

América	Promedio	Desviación típica
Línea de atraque (m)	820	298
Nº bloques	15,0	9,6
Anchura bloque (contenedores)	9,7	2,1
Altura de apilado	5,0	0,0
ASC por bloque	1,7	0,6
Longitud bloque promedio (m)	302	95
Longitud bloque promedio (TEUs)	45,7	14,0
Grúas STS	7,7	4,0
Capacidad de almacenamiento (TEUs)	33.345	25.399
Densidad de almacenamiento (TEUs/Ha)	1.175	220
Relación capacidad almacenamiento/STS	4.074	1.029



Oceania	Promedio	Desviación típica
Línea de atraque (m)	455	173
Nº bloques	7,0	3,6
Anchura bloque (contenedores)	9	0
Altura de apilado	5	0
ASC por bloque	2	0
Longitud bloque promedio (m)	212	20
Longitud bloque promedio (TEUs)	32	3
Grúas STS	3,7	0,6
Capacidad de almacenamiento (TEUs)	10.470	6.104
Densidad de almacenamiento (TEUs/Ha)	1.192,0	398,7
Relación capacidad almacenamiento/STS	2.928	1.667

En primer lugar, destaca la gran dispersión de datos en Asia, debido a que se tienen desde terminales muy grandes, como es el caso de Singapur, a otras muy pequeñas. Aunque el enfoque de este apartado no va a ser tanto de variables que dependan exclusivamente del tamaño de la terminal (línea de atraque, por ejemplo), sino más de la tipología de los bloques y de relaciones entre variables.

Queda claro, que, la anchura de los bloques es mayor en las terminales asiáticas, seguida por las europeas, americanas y oceánicas. El consenso es todavía mayor en cuanto a la altura máxima de apilado, estando normalmente sobre los 5 contenedores, habiendo contadas excepciones que tengan 6 o 4 contenedores. Sucede lo mismo en el número de grúas por bloque, siendo en casi la totalidad de los casos de 2.

Respecto a la longitud del bloque se pueden apreciar diferencias notables, estando el mayor promedio en el continente americano, aunque fuertemente influenciado por una de las terminales de Virginia, que tiene una longitud de 400m. Con esa excepción, Asia tiene los bloques más largos, seguida por Europa, teniendo la dispersión en ambos casos un orden de magnitud similar. En cambio, en Oceanía se tienen unos bloques relativamente cortos, del orden de 200 metros, siendo esto causa del pequeño tamaño que tienen las terminales de dicho continente.

Es sorprendente los resultados en cuanto a la capacidad de almacenamiento por Hectárea, ya que, las terminales europeas son las que obtienen un mayor resultado, además, con una baja dispersión. En el resto de continentes se obtienen resultados con parecidos, aunque con una mayor dispersión.



6.2 Planificación

En el presente apartado se va a hablar por una parte de los factores que llevan a automatizar una terminal, profundizando en aquellos aspectos ya mencionados en el apartado de introducción, pasando por los factores clave para llevar a cabo una automatización satisfactoria, así como las perspectivas para su ejecución física.

En la planificación de una terminal se tienen cuatro líneas estratégicas (Monfort Mulinas et al., 2012):

- Excelencia operativa
- Desarrollo (Know How)
- Crecimiento
- Integración en el entorno

La excelencia operativa está íntimamente ligada al uso de los recursos, es decir, en la mejora de la eficiencia o productividad, mientras que el crecimiento a tener un mayor volumen de operaciones (Monfort Mulinas et al., 2012). El desarrollo está referido a la aplicación del conocimiento preexistente. Por último, la integración en el entorno es la única variable que no está ligada necesariamente al rendimiento económico, siendo las políticas medioambientales, tratando de minimizar los impactos, además de una estrategia de RSC (Monfort Mulinas et al., 2012).

De estas líneas estratégicas aplicables a cualquier terminal, se deben extraer aquellos aspectos específicos en una terminal automatizada. La excelencia operativa y crecimiento son la base, en general, que lleva a un operador a automatizar una terminal, debido a que se puede aumentar la capacidad de la terminal, aumentar el máximo de movimientos, y además hacerlo con una mayor eficiencia. También es muy importante el desarrollo, ya que la automatización de terminales supone una innovación *per se*, pero no se debe de olvidar la visión a futuro de una inversión que en muchas ocasiones puede superar los 500 millones de dólares, y, por tanto, tratar desde el proceso de planificación que la terminal no quede obsoleta en el tiempo de vida útil o concesión, y que además pueda ser competitiva en su entorno al fin del mismo. Debido a estas grandes inversiones es recomendable usar técnicas de simulación por una parte para optimizar la infraestructura (Obrer Marco, 2016), pero además tener una confirmación que el diseño y el número de vehículos y grúas es correcto (Rintanen and Thomas, 2016).



En general, y siendo lo siguiente aplicable a cualquier terminal de contenedores, ya sea automatizada o no, se tienen ocho factores de competitividad (Tongzon and Heng, 2005):

- Nivel de eficiencia en las operaciones
- Tarifas portuarias
- Fiabilidad
- Preferencia de selección de puertos de transportistas y navieras
- Calados
- Adaptabilidad a los cambios del mercado
- Accesibilidad por tierra
- Diferenciación del producto

Haciendo una comparativa entre una terminal convencional y una automatizada, en base a los factores anteriores, se observa que esta última puede ser más competitiva en ciertos aspectos, tales como, el nivel de eficiencia de operaciones y fiabilidad, aunque esta última puede ser un arma de doble filo. La fiabilidad puede ser mayor en una terminal automatizada por una sencilla razón, y es la exigencia que la maquinaria debe estar al 100% para que sea operativa, con un mayor grado de mantenimiento. Por el contrario, en caso de avería, se producen situaciones de bloqueo que paralizan la terminal, y este es un aspecto que se debe de contar en fase de planificación. en especial, una vez tomada la decisión de automatizar, se debe prepararse para esta situación en fase de diseño o proyecto.

En cuanto al resto de variables, muchos de ellos no son propios de la tipología de la terminal, ni tan siquiera decisión de los operadores, sino de las autoridades portuarias. Hay ciertos indicios que llevan a pensar que las autoridades portuarias son un actor con mucho peso en la automatización portuaria.

Si se unen tanto las terminales semiautomatizadas, como las automatizadas, se ve que existen 43 terminales en 20 puertos. Del total de terminales, 23, se concentran en tan solo 8 puertos, es decir, el 53% de las terminales existentes se sitúan en el 40% del total de puertos que tiene alguna terminal automatizada o semiautomatizada. Esto se puede deber a dos motivos. El primero de ellos es por un deseo de automatizar por parte de la autoridad portuaria, aunque, por otro lado, también se puede deber a un gran volumen de tráfico, y la propuesta de automatización sea hecha por parte del operador.

Por otro lado, también es importante considerar el tipo de desarrollo que una terminal de este tipo tiene, si es Brownfield o Greenfield. El desarrollo Brownfield implica que la automatización se lleva a cabo en una terminal o espacio portuario



existente, mientras que, un desarrollo tipo Greenfield implica que la terminal automatizada se lleva a cabo en un nuevo espacio portuario.

Ambos desarrollos tienen ventajas e inconvenientes. El desarrollo Brownfield tiene las siguientes características:

- Aprovecha un suelo portuario existente, con el ahorro de nuevos rellenos, y obras de abrigo, en el caso que estas fueran necesarias.
- Tiene el inconveniente de necesitar largos periodos de tiempo, con una disminución del espacio útil de la terminal, con posibles restricciones a nivel del volumen de tráfico que pueda manejar.
- Al desarrollarse en base a una terminal existente, pueden tenerse formas que no sean favorables a la automatización o que tengan formas irregulares, causando ciertos perjuicios.

En cuanto al desarrollo Greenfield, se tiene lo siguiente:

- Implantación en nuevos desarrollos portuarios, normalmente exteriores, que, pese al inconveniente de tener un coste adicional de obras de abrigo, e incluso de ganar terreno al mar, tienen calados algo superiores.
- El desarrollo de la automatización resulta algo más sencilla, ya que el layout se puede realizar con formas regulares, lo que evita ciertos inconvenientes.

En las terminales existentes, solamente 8, entre automatizadas y semiautomatizadas han tenido un desarrollo brownfield, siendo repartido de forma igual (4), entre semiautomatizadas y automatizadas. Es, por tanto, que en proporción, hay más desarrollo tipo brownfield en terminales automatizadas (30%), que en semiautomatizadas (14%), lo que sorprende un poco. Cabe mencionar que la automatización de grúas ya existentes no se considera un desarrollo brownfield. En cambio, si fuesen necesarias obras o un cambio en las grúas, sí se consideraría como tal. Es un resultado sorprendente, debido a que se partía con la premisa de que un desarrollo brownfield era más factible en semiautomatizadas.

Una de las decisiones más importantes en una terminal automatizada, es la elección del TOS (Terminal Operating System), ya que tiene mucha relevancia en la fase previa de puesta en servicio, una vez hecha la elección de la tipología de la terminal, así como del equipamiento que va a emplearse, debido a que el TOS es el encargado de la optimización de las operaciones, y, por tanto, debe tener una modelización adecuada a la terminal para poder ofrecer un buen



rendimiento y eficiencia (Böse, 2011). Si la modelización no se realiza adecuadamente y se realiza una simulación en base a esta, se pueden tener variaciones respecto a la realidad de hasta un 50% (Böse, 2011).

Cabe mencionar que los TOS son sistemas modulares, adaptados completamente a las necesidades del cliente, aunque a nivel de optimización, este último no sepa exactamente cómo se realiza, siendo en muchos casos una optimización muy básica.

También es relevante que no hay muchos sistemas disponibles en el mercado, siendo los más frecuentes el Navis N4, CATOS y Kalmar. En las terminales automatizadas destaca principalmente el primero de ellos.

En cuanto a la correcta modelización de la terminal para su simulación, se ha llevado a cabo un estudio, donde se consideraba la implantación de una nueva terminal basada en IAVs, y en el cual se pretendía generar un sistema de toma de decisiones (Dong et al., 2011). En el mismo se pretende dividir los distintos problemas de asignación, rutas, y demás, que se tienen a la hora de planificar una terminal. Usualmente todos estos estudios se tratan de forma independiente, de forma que el resultado del anterior son los datos de partida del siguiente, mientras que debería ser tratado como uno solo para tratar de llegar a una optimización de la terminal durante la fase de planificación (Dong et al., 2011).

Es por lo anterior, que una terminal debe tener una planificación adecuada si se quieren conseguir unos objetivos de tráfico y rentabilidad económica determinados, siendo esto especialmente relevante en el caso de terminales automatizadas, donde el margen de maniobra en fase de construcción puede resultar complicado, y una vez se inicien operaciones, puede resultar inviable.



Capítulo 7. Innovaciones futuras en el ámbito de las TPC automatizadas.

7.1 Innovaciones en el subsistema de almacenamiento

Un ejemplo muy claro de una futura innovación en este subsistema es el concepto presentado por la operadora global de terminales DP World y la empresa SMS Group, pensada para su implantación en la nueva terminal de Jebel Ali Terminal 4, localizada en los EAU. Este sistema trata básicamente de la aplicación de un sistema de high-bay, ampliamente utilizada en almacenes convencionales, a una terminal de contenedores. Este sistema se basaría, tal y como se muestra en las figuras siguientes, en una estructura metálica, en la cual se tienen slots o compartimentos individuales para cada contenedor, no teniendo que apilarse uno sobre otro, permitiendo el acceso a cada contenedor sin tener que hacer movimientos innecesarios, además de poder tener alturas mayores de apilado, considerándose en este caso particular 50 metros, con 11 alturas de apilado. La aplicación de este nuevo sistema podría producir un aumento de la capacidad de almacenamiento de un 200%, respecto de una terminal convencional (SMS group GmbH, 2018).



Figura 90.. High-bay storage system propuesto en Jebel Ali Terminal 4. Fuente: (SMS group GmbH, 2018)

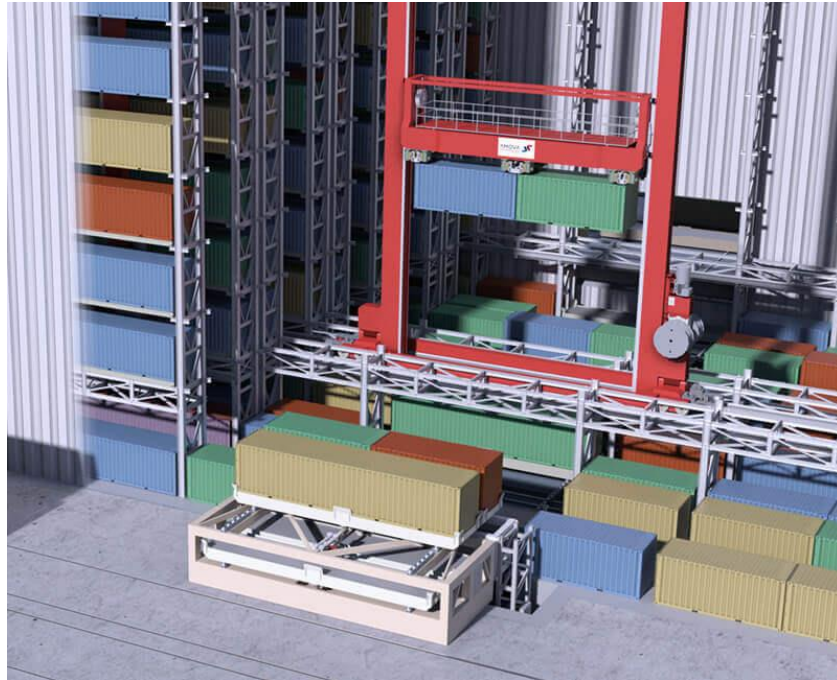


Figura 91. Detalle del High-bay storage system. Fuente: (AMOVA, n.d.).

Un sistema similar fue construido en “Tokyo Ohi Berth 6” en el año 2011, aunque con diferencias sustanciales (“DP World unveils new yard system,” n.d.).

Otra propuesta, que al igual que las anteriores, es basada en un almacenamiento sustentado de forma alguna por una estructura de hasta 10 pisos. A este tipo de almacenamiento se le ha llamado **Container Handling Facility (CHF)** (Braverman et al., 2016).

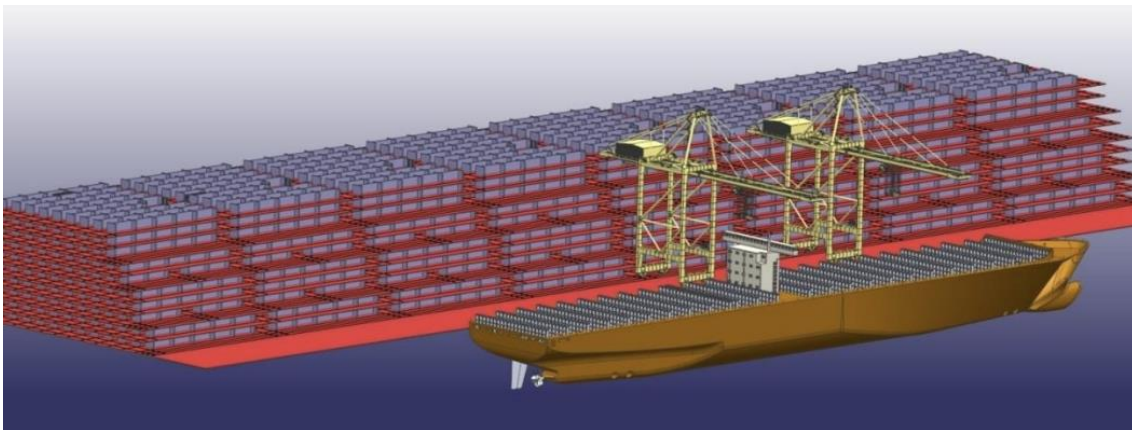


Figura 92. Vista general del CHF. Fuente: (Braverman et al., 2016).

Este sistema es completamente diferente al High Bay Storage System, visto anteriormente, debido a que, en el presente, la carga o descarga en el almacenamiento la realiza un vehículo con características parecidas a un L-AGV, debido a que deposita o recoge los contenedores de unas guías, desacoplando movimientos, aunque con bastantes peculiaridades, ya que son AGVs de 20 pies, que pueden acoplarse para transportar un contenedor de 40', y deben de ser capaces de moverse lateralmente (Braverman et al., 2016), muy en la línea de los IAVs.

Los movimientos verticales, desde el suelo hasta el nivel de almacenamiento en el cual se quiera recoger o descargar un contenedor se realiza a través de ascensores, que suben los AGVs (Braverman et al., 2016).

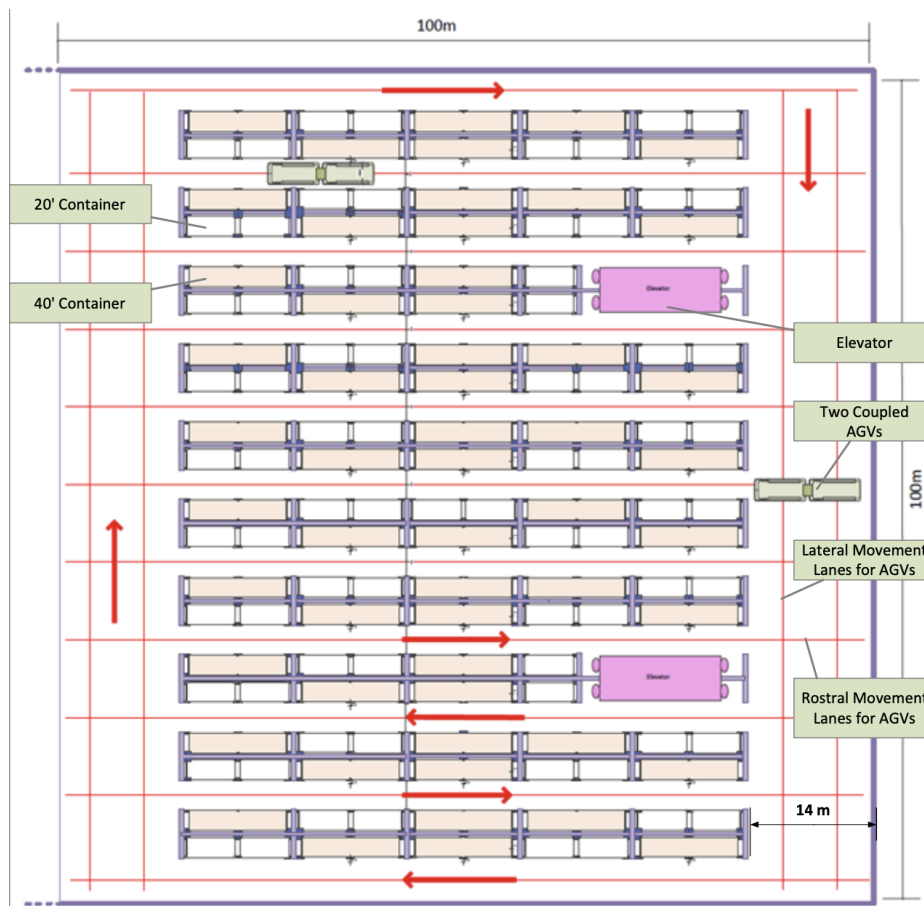


Figura 93. Layout interno del CHF. Fuente: (Braverman et al., 2016).

Las grúas de muelle recogen los contenedores, no desde el suelo, sino desde unos balcones habilitados para los AGVs, en el extremo de la estructura, tal y como se puede observar en la siguiente figura.

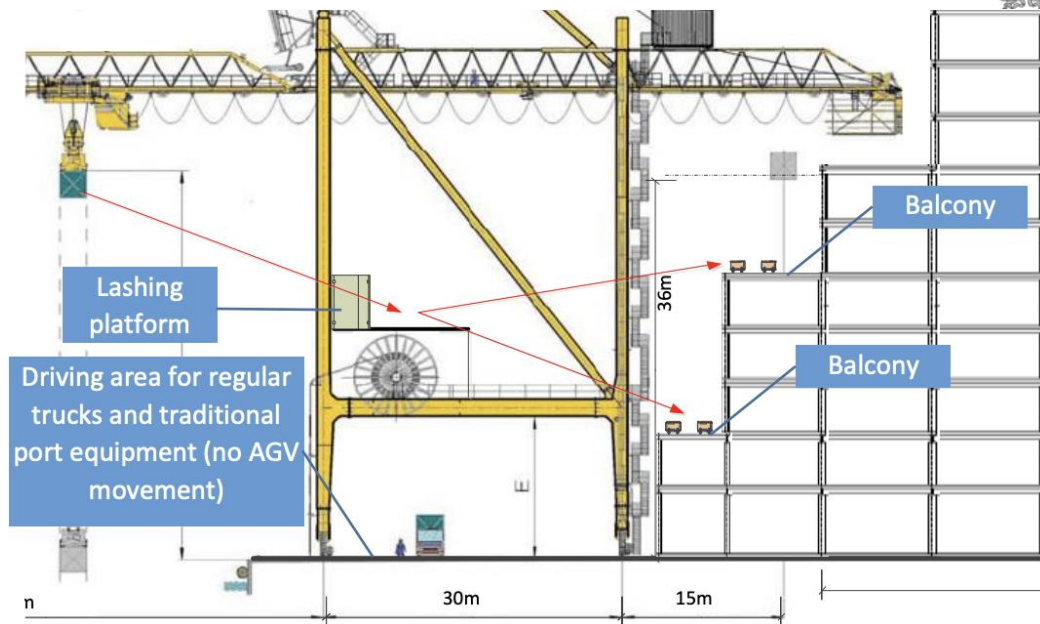


Figura 94. Interacción del CHF con las grúas STS a través de balcones. Fuente: (Braverman et al., 2016).

En una comparación a nivel cualitativo con ARMGs y RTGs, se considera que el CHF, tiene unos costes de inversión y operativos más altos, siendo la principal ventaja de este sistema la gran densidad de apilado (RCMS Working Group, 2015).

Otra propuesta de innovación en el subsistema de almacenamiento ha sido el concepto propuesto por el fabricante de grúas ZPMC, llamándolo Frame Bridge. Este consiste una estructura con sistema multicapas entre las grúas de muelle y el subsistema de almacenamiento, y entre los propios bloques de este último, reduciendo así los movimientos horizontales de los ASCs, reduciendo interferencias entre conexión, minimizando tiempos de espera, y teniendo una gran importancia en aquellas terminales con una longitud de muelle considerable. (Yan et al., 2014)

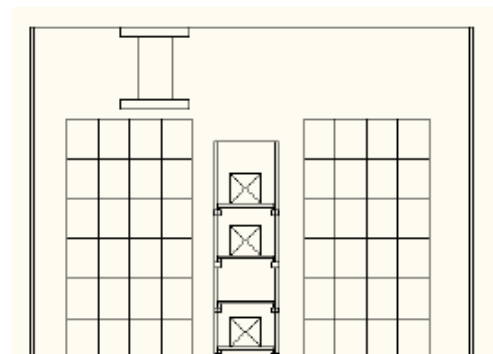
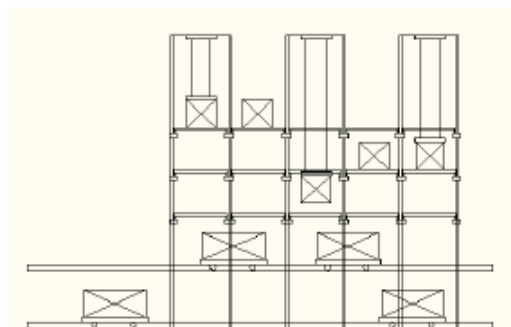


Figura 95. Esquema de marco multicapa. A la izquierda el propuesto entre el muelle y el patio. A la derecha el propuesto en los bloques del subsistema de almacenamiento. (Yan et al., 2014).

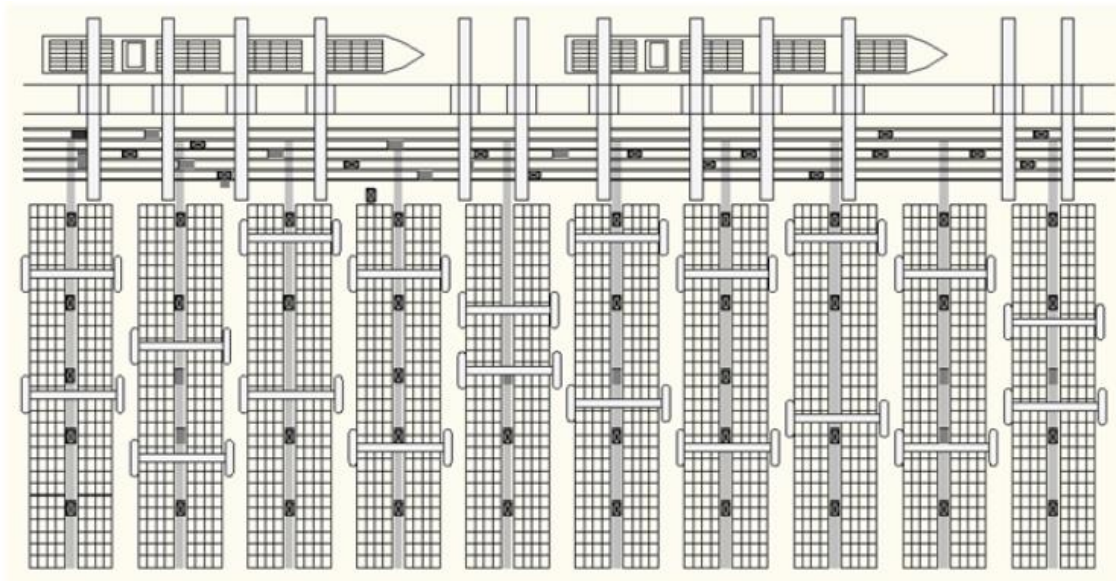


Figura 96. Layout de la terminal de la propuesta de Yan et al., 2014. Fuente: (Yan et al., 2014)

Además, tal y como se puede observar en la anterior figura, se observa que cada bloque de almacenamiento tiene un espacio en el medio del mismo, en dirección perpendicular al muelle. Esto sucede por dos motivos: el primero de ellos es para realizar la interconexión de la puerta terrestre a las grúas situadas entre los bloques de almacenamiento y el muelle, descritas en el anterior párrafo, realizándose todo ello con lo que los autores llaman “Yard Transport Vehicle”, siendo plataformas sobre raíles (Kim et al., 2012). En segundo lugar, y mostrándose en la figura siguiente, se amplía el espacio de almacenamiento de cada bloque, incrementándose un 9% en el estudio realizado (Yan et al., 2014).

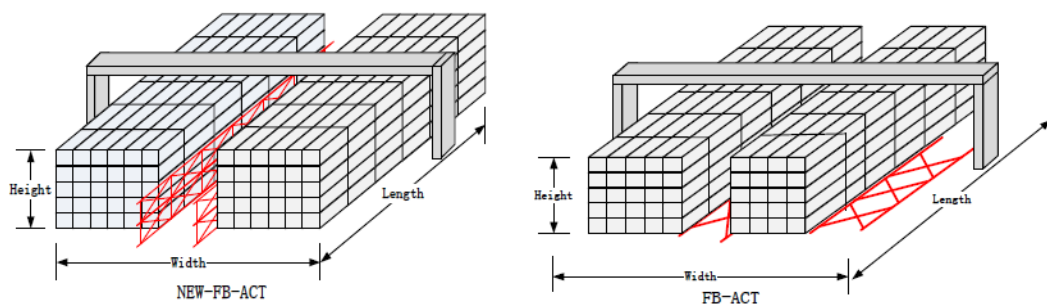


Figura 97. Nuevo concepto de almacenamiento en ACTs. Fuente: (Yan et al., 2014).



7.2 Innovaciones en el subsistema de interconexión

Uno de los avances que se verán muy probablemente en los próximos 10-15 años, son los camiones autónomos. Esto tiene una gran aplicación en el ámbito de las terminales automatizadas, en primer lugar, porque se podría pensar en su aplicación como elemento de interconexión. Pero, además, tal y como se propone en el proyecto CARGO-ANTS, si se incorporan los sensores y software adecuado, puede circular dentro de la terminal mezclándose, incluso, con los AGV (“Final Report Summary - CARGO-ANTS (Cargo handling by Automated Next generation Transportation Systems for ports and terminals) | Report Summary | CARGO-ANTS | FP7 | CORDIS | European Commission,” n.d.). Esta propuesta se considera muy interesante, especialmente, en su aplicación para terminales basadas en almacenamiento con bloques paralelos al muelle.

Uno de los problemas más frecuentes en terminales portuarias de contenedores es la intermodalidad, especialmente con el ferrocarril, debido en primer lugar, a la decisión de la elección del modo de interconexión y la decisión para formar el convoy.

El primer aspecto mencionado en el anterior párrafo no solo tiene que ver con la automatización, sino en un modo más general con la maquinaria para llevarlo a cabo. Resulta sorprendente que este cambio de modo de transporte no esté conectado en terminales portuarias de contenedores, en la gran mayoría de ocasiones, por un sistema automatizado, siendo muy pocas las terminales con ello, como por ejemplo Maasvlakte II.

Para paliar este problema, y debido al problema de grandes costes operacionales del ferrocarril, especialmente en cortas distancias y para cargas pequeñas, se propone un nuevo elemento que permita la interconexión entre el muelle y las terminales ferroportuarias, el **Automated Guided Wagon (AGW)**.

El AGW tiene como objetivo resolver la problemática de formación de convoyes, especialmente en terminales ferroportuarias. Para ello se basa en un vagón con un motor eléctrico, un gancho automático para realizar la conexión entre dos vagones. Pero la gran diferencia respecto a un vagón convencional se encuentra en la unidad de control, ya que esta tiene una comunicación con la infraestructura a través de distintos mecanismos y una serie de sensores (térmicos, Lidar, entre otros) que permiten la detección de personas u objetos en las proximidades, garantizando la seguridad de estos (Gattuso and Cassone, 2017).



La aplicación portuaria de este nuevo elemento de interconexión ha sido estudiada por los autores para su aplicación en el puerto italiano de Gioia Tauro, que, pese a no estar automatizado, la investigación llevada a cabo presenta elementos muy interesantes, concluyéndose que los costes de usar el AGW son menores a los convencionalmente usados para la formación de convoyes ferroviarios, aunque con la particularidad de que no se incluyen los costes asociados a mantenimiento ni amortización de la infraestructura necesaria (Gattuso and Cassone, 2018). Este aspecto puede ser relevante en puertos donde se tengan varias terminales de contenedores, ya que, en lugar de la forma tradicional de formación de convoyes ferroviarios, formados en cada terminal, se puede acelerar esta formación si se dispone de un espacio común ferroviario en las proximidades del puerto, haciendo uso de esta innovación, con los consiguientes beneficios tanto para los operadores ferroviarios, terminales y sector logístico en su conjunto.

Esta propuesta puede tener grandes aplicaciones en puertos con una gran carencia de espacio, si se decide prescindir de la terminal ferroportuaria, aunque puede implicar grandes complicaciones en la operativa interna de la terminal portuaria.

Por otro lado, y como se ha mencionado anteriormente, en las completamente terminales automatizadas, solo una (Maasvlakte II) tiene automatizada la interconexión entre el patio y la terminal ferroportuaria. Esto sucede por la imposibilidad de mezclar a los camiones con AGVs, teniendo que segregar un espacio para esta interconexión, debido a que también es necesario la entrada de los camiones a los bloques.

Otra innovación muy parecida a la anterior fue la que surgió a partir del proyecto europeo "ISTU", el cual proponía la realización de vagones autónomos, para cerrar el ciclo de las terminales automatizadas, es decir, que la automatización portuaria no acabase en el recinto portuario, y unir estos con los centros de distribución de mercancías, objetivo diferente a la propuesta anterior. Estos vagones pueden formar convoyes de 2 vagones, con una velocidad de funcionamiento de 12 km/h y un máximo de 50 km/h. Para garantizar la autonomía de estos se propone una propulsión diésel (ISTU STREP Project, 2006).



Figura 98. Espacio dedicado a la interconexión con el FFCC en Maasvlakte II.

7.3 Innovaciones en TICs

Además, de las innovaciones comentadas anteriormente en el apartado en el 4.6, en el presente apartado se añaden algunas cuya implantación no es tan factible como las de dicho apartado.

En primer lugar, y tal y como se ha comentado en repetidas ocasiones, una de las problemáticas que llevan a ineficiencias, tanto como para la terminal, pero en cierta medida también pueden perjudicar a los conductores, son las llegadas y salidas de contenedores de la terminal. Para acabar con esto, el proyecto europeo **COMCIS (Collaborative Information Services for Container Management)**, propone un uso de los datos para acabar con estos inconvenientes (Knors et al., 2014).

Para ello, se propone una arquitectura de tres etapas. En primer lugar, una consolidación de los datos, seguido de una estandarización y agregación de los mismos, para que el usuario final pueda acceder a ellos de una manera fácil (Knors et al., 2014).



Mucho más en detalle, se llevó a cabo un proyecto piloto en las terminales de ECT (Delta, Euromax y otra terminal convencional), el cual consistía en realizar en base a ese tratamiento de datos, un predictor de descarga de buques (COMCIS, n.d.). Los resultados fueron positivos, siendo este sistema preciso en un 95% de los casos, y pudiendo aumentar la eficacia si este concepto se integra con el resto de información generada por los usuarios del puerto.



Capítulo 8. Conclusiones y futuras líneas de investigación y desarrollo

En primer lugar, y como ha resultado obvio a lo largo de este trabajo, se tiene una dicotomía entre el camino de avance de los fabricantes de maquinaria, y su implantación en las terminales, y los aspectos tratados en el ámbito académico. Un ejemplo de ello, son los ALVs, que llevan estudiándose desde el año 2002 en profundidad, siendo el primer estudio algo anterior. En concreto resulta sorprendente que haya infinidad de estudios estudiando los ALVs como vehículo de interconexión, pero solo una terminal lo haya aplicado para esta función. Por el contrario, se tienen los L-AGV, que pese a tener una mayor implantación, no ha habido ningún problema resuelto. En definitiva, los estudios en el ámbito académico se concentran en unas pocas áreas, olvidando ciertos asuntos que tendrían un gran interés.

También se han de mencionar la potencialidad que pueden tener las colaboraciones entre la academia y operadores o fabricantes de maquinaria, debido a que se podrían lograr mejores optimizaciones, teniéndose como ejemplo el estudio de scheduling realizado en base a la terminal de AutoStrad Brisbane (Skinner et al., 2013).

Es destacable el hecho que haya un mayor número de estudios relativos al subsistema de almacenamiento, que al subsistema de interconexión. Aunque es cierto, que esto no es algo negativo si se tiene en cuenta la gran inversión necesaria en el primero, además de los mayores costes de operación.

En cuanto a los algoritmos usados, resulta obvio que existe una tendencia abrumadora hacia algoritmos genéticos para problemas de scheduling y otros que requieran de un bajo tiempo de computación y que además tengan un gran tamaño. También destacan otros algoritmos basados en grafos, como ramificación y poda (Branch & Bound), usado principalmente para resolver asignaciones de tareas, tanto a interconexión, como a almacenamiento, especialmente en entornos no dinámicos y aplicado a problemas de pequeña magnitud. También destaca el algoritmo de Dijkstra, empleado fundamentalmente para determinación del camino óptimo en vehículos.

Es probable que, en optimización de operaciones en terminales de contenedores automatizadas, se cambie ligeramente las tendencias en cuanto a inteligencia artificial y machine learning, que posibiliten cortos tiempos de computación a algoritmos cambiantes en tiempo real. Esto permitirá la optimización en todo tipo de situaciones. Además, muy en la línea de perseguir la máxima eficiencia, en



especial para aquellos vehículos que no desacoplen movimientos, se debe de profundizar más en el estudio de la minimización de tiempos de espera con una minimización del consumo energético.

En cuanto al análisis de las terminales automatizadas y semiautomatizadas existentes, se ha de destacar el escaso número de ambas, además, de la tendencia a concentrarse en ciertos puertos con un gran volumen de tráfico. También es de interés que ciertas terminales con un tamaño medio, en cuanto a su tráfico, estén apostando por la automatización. Es previsible que en un futuro próximo se vaya apostando progresivamente por maquinaria que actualmente no tiene mucha relevancia, como es el caso de los ALVs y ARTGs, conforme se vayan viendo los beneficios reales que pueden aportar y haya más casos en los que se pueda basar dicha decisión.

Seguidamente, y como se ha podido comprobar en el análisis realizado anteriormente, sí existe cierta similitud en el diseño de las terminales completamente automatizadas con el subsistema de almacenamiento basado en ARMGs, el cual es el mayoritario. Sucede lo contrario con las terminales semiautomatizadas, donde hay una gran casuística en cuanto al diseño de las mismas, únicamente existiendo cierta coincidencia en el tamaño del bloque (apilado y anchura).

Cambiando de dinámica, queda claro que la automatización de una terminal produce una mejora de la eficiencia de la misma, y lo que es más importante, reduce en cierto modo la incertidumbre en cuanto a la productividad, siempre teniendo en cuenta aspectos externos que pueden variar. Es por ello, que la eficiencia de la terminal no solo depende de ella misma, sino en aspectos tales como la incertidumbre y aleatoriedad de llegadas de camiones externos. Para reducir todo ello, es necesario una aplicación de tecnología que trascienda al espacio de la terminal, innovando y mejorando esta en base al conjunto de la cadena logística.

Uno de los aspectos que mayor relevancia tiene a la hora de automatizar una terminal es la integración de todas las órdenes en el TOS, con las ventajas que ello supone. Además, en los próximos años con el desarrollo de la industria 4.0, se tendrán previsiblemente, una mayor cantidad de datos que pueden ayudar, tanto al control de la terminal, como a la mejora de la eficiencia y a la programación del mantenimiento, que es uno de los elementos clave para el éxito de una terminal automatizada.



Por último, y enlazándolo con el potencial de las aplicaciones de la industria 4.0 en el entorno portuario, no se debe olvidar que la mayor vulnerabilidad de una terminal automatizada son los ataques cibernéticos. Por ejemplo, en 2017 un ataque con el ransomware “NotPetya” causó una parada de una semana en APM Terminals Massvlakte II (JOC, 2017). Por tanto, es preferible que las terminales portuarias, en general, y muy especialmente, las automatizadas, estén completamente aisladas de internet.

En cuanto a las futuras líneas de investigación, cabe mencionar que estas no se deben entender como extensión de este trabajo, sino como objeto de lo observado en el mismo. A continuación, se enumeran estas.

- En primer lugar, y teniendo presente el capítulo de innovaciones, es necesario una mayor concentración de estudios en aquellos aspectos que todavía no se han estudiado, o se han hecho someramente, en lugar de hacer propuestas que pueden resultar inviables. Se deben estudiar aquellos elementos, que se están aplicando actualmente en terminales automatizadas, como es el caso de los L-AGV, ARTGs, entre otros, además de realizar algún estudio sobre los beneficios que pueden tener las terminales semiautomatizadas. En cuanto a las innovaciones, hay algunas muy interesantes, como el AGW o el High Bay Storage System, pero hay otras como el Frame Bridge que no son en ningún caso realistas. Es por ello, que se deben de concentrar esfuerzos en aquello que sea factible, en lugar de realizar múltiples propuestas sin sentido alguno.
- Se debe estar al tanto, de las mejoras procedentes de la aplicación de IoT y redes 5G, y desarrollo de aplicaciones en base a esta última tecnología, en las terminales automatizadas, debido a que la innovación en este tipo de terminales, en un futuro no muy lejano va a proceder principalmente de la aplicación de estas tecnologías. A través del IoT se puede tener una mayor sensorización de los distintos elementos que componen la terminal, con las ventajas que ello puede suponer, especialmente a nivel de mantenimiento y operación. Por otro lado, las aplicaciones basadas en redes 5G pueden aportar nuevas funcionalidades a las terminales automatizadas.
- Además, ligado con lo anterior, se deben de encontrar fórmulas que permitan un mayor aprovechamiento de los datos disponibles, tanto en presente, como en un futuro en el cual habrá una mayor cantidad de estos. Y es por ello, que se debe de pensar en el tratamiento y almacenamiento



de los mismos, pero especialmente en el uso que puede dar, para aprovechar al máximo las potencialidades que estos ofrecen.

- Por último, se insiste en la necesidad de mejorar los algoritmos actualmente aplicados en las terminales para resolver los problemas de asignación de tareas y scheduling, entre otros. Además, este aspecto tiene cierta conexión con el punto anterior, debido a que cuanto mayores sean los datos, y por ende, la extensión de los problemas, se deben desarrollar algoritmos que puedan dar soluciones óptimas en un corto periodo de tiempo.



Referencias

- Alho, T., Pettersson, T., Miikka, H., 2018. The path to automation in an RTG terminal.
- AMOVA, n.d. START MOVING. – AMOVA GmbH [WWW Document]. AMOVA. URL <http://www.amova.eu> (accessed 3.17.19).
- Angeloudis, P., Bell, M.G.H., 2010. An uncertainty-aware AGV assignment algorithm for automated container terminals. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 46, 354–366. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2009.09.001>
- Bae, H.Y., Choe, R., Park, T., Ryu, K.R., 2011. Comparison of operations of AGVs and ALVs in an automated container terminal. *Journal of Intelligent Manufacturing* 22, 413–426. <https://doi.org/10.1007/s10845-009-0299-1>
- Bahnes, N., Kechar, B., Haffaf, H., 2016. Cooperation between Intelligent Autonomous Vehicles to enhance container terminal operations. *Journal of Innovation in Digital Ecosystems* 3, 22–29. <https://doi.org/10.1016/j.jides.2016.05.002>
- Bish, E.K., Chen, F.Y., Leong, Y.T., Nelson, B.L., Ng, J.W.C., Simchi-Levi, D., 2005. Dispatching vehicles in a mega container terminal. *OR Spectrum* 27, 491–506. <https://doi.org/10.1007/s00291-004-0194-2>
- Böse, J.W. (Ed.), 2011. *Handbook of Terminal Planning, Operations Research/Computer Science Interfaces Series*. Springer New York, New York, NY. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8408-1>
- Branch, A.E., 2007. *Elements of shipping.*, 8th ed.. ed. Routledge, London ; New York.
- Braverman, M., Danino, Y., Lepek, H., Mordecai, Y., 2016. Rethinking Container Management System (RCMS). *AGV Testing and Performance*.
- Briskorn, D., Zey, L., 2018. Resolving interferences of triple-crossover-cranes by determining paths in networks. *Naval Research Logistics* nav.21819. <https://doi.org/10.1002/nav.21819>
- Bryfors, U., 2014. Embracing automation.
- Camco, n.d. Automation solutions for container terminals. Camco. URL <https://www.camco.be/solutions/container-terminals/> (accessed 7.12.19).
- Carlo, H.J., Martínez-Acevedo, F.L., 2015. Priority rules for twin automated stacking cranes that collaborate. *Computers & Industrial Engineering* 89, 23–33. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2015.04.026>



- Carlo, H.J., Vis, I.F.A., Roodbergen, K.J., 2015. Seaside operations in container terminals: literature overview, trends, and research directions. *Flex Serv Manuf J* 27, 224–262. <https://doi.org/10.1007/s10696-013-9178-3>
- Carlo, H.J., Vis, I.F.A., Roodbergen, K.J., 2014a. Storage yard operations in container terminals: Literature overview, trends, and research directions. *European Journal of Operational Research, Maritime Logistics* 235, 412–430. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.10.054>
- Carlo, H.J., Vis, I.F.A., Roodbergen, K.J., 2014b. Transport operations in container terminals: Literature overview, trends, research directions and classification scheme. *European Journal of Operational Research* 236, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.11.023>
- Cederqvist, H., 2011. Is yard automation getting easier?
- Cerderqvist, H., Holmgren, C., 2010. Investment vs. operating costs: a comparison of automatic stacking cranes and RTGs.
- Chao, S.-L., Lin, Y.-J., 2011. Evaluating advanced quay cranes in container terminals. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 47, 432–445. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2010.12.002>
- Chatti, N., Gehin, A.-L., Ould-Bouamama, B., Merzouki, R., 2013. Functional and Behavior Models for the Supervision of an Intelligent and Autonomous System. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* 10, 431–445. <https://doi.org/10.1109/TASE.2012.2211350>
- Choe, R., Kim, J., Ryu, K.R., 2016. Online preference learning for adaptive dispatching of AGVs in an automated container terminal. *Applied Soft Computing* 38, 647–660. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2015.09.027>
- COMCIS, n.d. COMCIS. Taking the extended gateway to the next level. URL http://www.comcis.eu/downloads/ect_newsletter.pdf
- Dong, J., Wang, J., Bonsall, S., Yang, Z., Merzouki, R., 2011. A Decision Support Sysytem for IAV-based Container Port Operations., in: *International Forum on Shipping, P. and A., Liu, J.J., Hong Kong Polytechnic University, C.Y. Tung International Centre for Maritime Studies, Hong Kong Polytechnic University, Department of Logistics and Maritime Studies (Eds.), Proceedings of the International Forum on Shipping, Ports and Airports (IFSPA) 2010: Integrated Tranpostation Logistics, from Low Cost to High Responsibility: 15-18 October 2010, Chengdu, Sichuan, China. C.Y. Tung International Centre for Maritime Studies, Dept. of Logistics and Maritime Studies, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong.*



- Dorndorf, U., Schneider, F., 2010. Scheduling automated triple cross-over stacking cranes in a container yard. *OR Spectrum* 32, 617–632. <https://doi.org/10.1007/s00291-010-0206-3>
- Duinkerken, M.B., Evers, J.J.M., Ottjes, J.A., 2001. A SIMULATION MODEL FOR INTEGRATING QUAY TRANSPORT AND STACKING POLICIES ON AUTOMATED CONTAINER TERMINALS 8.
- EOS, n.d. Land Viewer | EOS [WWW Document]. Land Viewer. URL <https://eos.com/landviewer/> (accessed 7.21.19).
- European Commission, 2015. European ports gain competitive edge with InTraDE-Projects [WWW Document]. URL https://ec.europa.eu/regional_policy/en/projects/france/european-ports-gain-competitive-edge-with-intrade (accessed 5.14.19).
- European Space Agency, n.d. Copernicus Open Access Hub [WWW Document]. URL <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home> (accessed 7.21.19).
- Final Report Summary - CARGO-ANTS (Cargo handling by Automated Next generation Transportation Systems for ports and terminals) | Report Summary | CARGO-ANTS | FP7 | CORDIS | European Commission [WWW Document], n.d. URL <https://cordis.europa.eu/project/rcn/110967/reporting/en> (accessed 7.23.19).
- Gattuso, D., Cassone, G.C., 2018. AGW for efficient freight transport in container yard: models and costs. *Transportation Research Procedia* 31, 108–120. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.09.050>
- Gattuso, D., Cassone, G.C., 2017. Automated Rail Wagon for new freight transport opportunities. Presented at the 5th IEEE International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems: proceedings : Napoli, Hotel Royal Continental, 26-28, June, 2017, pp. 57–62.
- Gelareh, S., Merzouki, R., McGinley, K., Murray, R., 2013. Scheduling of Intelligent and Autonomous Vehicles under pairing/unpairing collaboration strategy in container terminals. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 33, 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2013.04.006>
- Gharehgozli, A.H., Vernooij, F.G., Zaerpour, N., 2017. A simulation study of the performance of twin automated stacking cranes at a seaport container terminal. *European Journal of Operational Research* 261, 108–128. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.01.037>
- Grunow, M., Günther, H.-O., Lehmann, M., 2004. Dispatching multi-load AGVs in highly automated seaport container terminals. *OR Spectrum* 26, 211–235. <https://doi.org/10.1007/s00291-003-0147-1>



- Gustafsson, T., Heidenback, C., 2002. Automatic control of unmanned cranes at the Pasir Panjang terminal. Presented at the IEEE Conference on Control Applications - Proceedings, pp. 180–185 vol.1. <https://doi.org/10.1109/CCA.2002.1040182>
- Gylling, T., 2013. The case for automated RTG container handling.
- Hamdi, S.E., Mabrouk, A., Bourdeaud'Huy, T., 2012. A Heuristic for the Container Stacking Problem in Automated Maritime Ports. Presented at the Proceedings of the 14th IFAC Symposium on Information Control Problems In Manufacturing, Bucharest, Romania, pp. 357–363.
- HHLA, n.d. Container in Hamburg - HHLA [WWW Document]. hamburg.de. URL <https://www.hamburg.de/hafen-heute/2346296/hhla-container/> (accessed 6.29.19).
- Hinkka, V., Eckhardt, J., Pinola, J., Rönty, J., Lastusilta, T., Khiari, J., Tardo, A., 2018. Capacity with a positive environmental and societal footprint: ports un the future era. COREALIS. Intra-Terminal Operations State of the Art Review.
- Homayouni, S.M., Tang, S.H., Ismail, N., Ariffin, M.K.A.M., Samin, R., 2009. A hybrid genetic-heuristic algorithm for scheduling of automated guided vehicles and quay cranes in automated container terminals. IEEE, pp. 96–101. <https://doi.org/10.1109/ICCIE.2009.5223858>
- Homayouni, S.M., Tang, S.H., Motlagh, O., 2014. A genetic algorithm for optimization of integrated scheduling of cranes, vehicles, and storage platforms at automated container terminals. Journal of Computational and Applied Mathematics 270, 545–556. <https://doi.org/10.1016/j.cam.2013.11.021>
- Hu, H., Chen, X., Wang, T., Zhang, Y., 2019. A three-stage decomposition method for the joint vehicle dispatching and storage allocation problem in automated container terminals. Computers & Industrial Engineering 129, 90–101. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.01.023>
- ISTU STREP Project, 2006. Integrated Standard Transportation Unit. Publishable Final Activity Report.
- JOC, 2017. Cyber attack had limited global impact on APMT [WWW Document]. URL [/port-news/impact-maersk-cyber-attack-apmt-was-limited-analysis-shows-20170714.html](https://www.joc.com/port-news/impact-maersk-cyber-attack-apmt-was-limited-analysis-shows-20170714.html), <https://www.joc.com/port-news/impact-maersk-cyber-attack-apmt-was-limited-analysis-shows-20170714.html> (accessed 7.28.19).
- Kalmar, 2015. Next generation Kalmar ASC system.
- Kalmar, n.d. Customer case: TraPac, USA [WWW Document]. URL <https://www.kalmarglobal.com/customer-cases/all-customer-cases/trapac-usa/> (accessed 7.16.19a).



Kalmar, n.d. DRIVE STRAIGHT – FIND THE BOX 6.

Kalmar to extend AutoRTG system at Dublin Ferryport Terminals to further improve operational efficiency | Kalmarglobal [WWW Document], n.d. URL https://www.kalmarglobal.com/pressroom/press_releases/2019/kalmar-to-extend-autortg-system-at-dublin-ferryport-terminals-to-further-improve-operational-efficiency/ (accessed 7.26.19).

Kavakeb, S., Nguyen, T.T., McGinley, K., Yang, Z., Jenkinson, I., Murray, R., 2015. Green vehicle technology to enhance the performance of a European port: A simulation model with a cost-benefit approach. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 60, 169–188. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.08.012>

Kemme, N., 2012. Effects of storage block layout and automated yard crane systems on the performance of seaport container terminals. *OR Spectrum* 34, 563–591. <https://doi.org/10.1007/s00291-011-0242-7>

Kim, K.H., Bae, J.W., 2004. A Look-Ahead Dispatching Method for Automated Guided Vehicles in Automated Port Container Terminals. *Transportation Science* 38, 224–234.

Kim, K.H., Phan, M.-H.T., Woo, Y.J., 2012. New Conceptual Handling Systems in Container Terminals. *Industrial Engineering and Management Systems* 11, 299–309. <https://doi.org/10.7232/iems.2012.11.4.299>

Knoors, F., Punter, M., Paganelli, P., Pondrelli, L., Seidel, S., Geerinck, P., 2014. How I can use COMCIS?

Konecranes, 2013. The Yard Revolution. Automated RTG.

Konecranes, n.d. AGV [WWW Document]. Konecranes. URL <https://www.konecranes.com/equipment/container-handling-equipment/automated-guided-vehicles/agv> (accessed 7.16.19a).

Konecranes, n.d. Automated Guided Vehicles [WWW Document]. Konecranes. URL <https://www.konecranes.com/equipment/container-handling-equipment/automated-guided-vehicles> (accessed 7.7.19b).

Konecranes, n.d. Lift AGV [WWW Document]. Konecranes. URL <https://www.konecranes.com/equipment/container-handling-equipment/automated-guided-vehicles/lift-agv> (accessed 7.7.19c).

Konecranes, n.d. Sistema RMG automatizado (ARMG) [WWW Document]. Konecranes. URL <https://www.konecranes.com/es-es/equipos/equipo-de-manipulacion-de-contenedores/sistema-rmg-automatizado-armg> (accessed 6.23.19d).



- Koo, P.H., Lee, W.S., Jang, and D.W., 2004. Fleet sizing and vehicle routing for container transportation in a static environment. *OR Spectrum* 26, 193–209. <https://doi.org/10.1007/s00291-003-0152-4>
- LASE GmbH, n.d. LASE GmbH - Moderne Lasermessgeräte & hochentwickelte Softwareapplikationen // State-of-the-art laser sensors & sophisticated software applications - LaseLCPS-STC - Load Collision Prevention System -STC [WWW Document]. URL <https://www.lase.de/en/products/port-logistics/lase-lcps-load-collision-prevention-system/laselcps-stc-load-collision-prevention-system.html> (accessed 7.20.19).
- Lau, H.Y.K., Zhao, Y., 2008. Integrated scheduling of handling equipment at automated container terminals. *International Journal of Production Economics* 112, 665–682. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2007.05.015>
- Le, H.M., Yassine, A., Moussi, R., 2012. DCA for solving the scheduling of lifting vehicle in an automated port container terminal. *Comput Manag Sci* 9, 273–286. <https://doi.org/10.1007/s10287-012-0140-8>
- Lochana Moorthy, R., Hock-Guan, W., Wing-Cheong, N., Chung-Piaw, T., 2003. Cyclic deadlock prediction and avoidance for zone-controlled AGV system. *International Journal of Production Economics* 83, 309–324. [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(02\)00370-5](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(02)00370-5)
- Loureiro, R., Merzouki, R., Bouamama, B.O., 2012. Bond Graph Model Based on Structural Diagnosability and Recoverability Analysis: Application to Intelligent Autonomous Vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 61, 986–997. <https://doi.org/10.1109/TVT.2012.2186472>
- Lu, H., Wang, S., 2019. A study on multi-ASC scheduling method of automated container terminals based on graph theory. *Computers & Industrial Engineering* 129, 404–416. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.01.050>
- Luo, J., Wu, Y., 2015. Modelling of dual-cycle strategy for container storage and vehicle scheduling problems at automated container terminals. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 79, 49–64. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2015.03.006>
- Małopolski, W., 2018. A sustainable and conflict-free operation of AGVs in a square topology. *Computers & Industrial Engineering* 126, 472–481. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.10.002>
- Mangan, J., Lalwani, C., Fynes, B., 2008. Port-centric logistics. *The International Journal of Logistics Management* 19, 29–41. <https://doi.org/10.1108/09574090810872587>
- Meersmans, P.J.M., 2002. Optimization of container handling systems, Tinbergen Institute research series. Thela Thesis, Amsterdam.



- Michalopoulos, D., Gajic, B., Banchs, A., Serrano, P., Droste, H., Barberis, S., Calochira, G., Tsakiris, A., Ketzaki, E., Mpatziakas, A., Tsolkas, D., Sekkas, O., Ajibulu, A., Bradford, J., Konstantinou, K., Pearson, K., Khatibi, S., Crippa, M.R., 2018. 5G Mobile Network Architecture for diverse services, use cases, and applications in 5G and beyond. Deliverable D6.2. Methodology for verification and validation of 5G-MoNArch architectural innovations.
- Monfort Mulinas, A., 2016. Análisis de los factores determinantes en el cálculo de la capacidad por línea de atraque de una Terminal de Contenedores: Propuesta de niveles de servicio en su concesionamiento.
- Monfort Mulinas, A., Aguilar Herrando, J., Gómez-Ferrer Boldova, R., Arnau Vinaixa, E., Martínez Alarcón, J., Monterde Higuero, N., Palomo Torralva, P., 2001. Terminales marítimas de contenedores: el desarrollo de la automatización. Fundación Instituto Portuario de Estudios y Cooperación de la Comunidad Valenciana, Valencia.
- Monfort Mulinas, A., Monterde Higuero, N., Sapiña García, R., Martin Soberon, A.M., Calduch Verduch, J.D., Gonçalves de Souza, P.V., 2011. La terminal portuaria de contenedores como sistema nodal en la cadena logística, Biblioteca técnica de la Fundación ValenciaPort Planificación y gestión portuaria. Fundación Valenciaport, Valencia.
- Monfort Mulinas, A., Monterde Higuero, N., Sapiña García, R., Martin Soberon, A.M., Calduch Verduch, J.D., Gonçalves de Souza, P.V., Fundación Valenciaport, 2012. Innovaciones tecnológicas y de gestión en terminales portuarias de contenedores, Biblioteca técnica de la Fundación ValenciaPort Planificación y gestión portuaria. Fundación Valenciaport, Valencia.
- Moussi, R., Yassine, A., Kansou, A., Galinho, T., 2011. Scheduling of lifting vehicles with time windows in an automated port container terminal, in: 2011 4th International Conference on Logistics. Presented at the 2011 4th International Conference on Logistics (LOGISTIQUA), IEEE, Hammamet, Tunisia, pp. 55–61. <https://doi.org/10.1109/LOGISTIQUA.2011.5939403>
- MSC, 2018. MSC and Traxens Launch IoT Pilot Project to Improve Terminal Efficiency [WWW Document]. URL <https://www.msc.com/aia/news/2018-december/msc-and-traxens-launch-iot-pilot-project-to-im-1> (accessed 7.14.19).
- Nguyen, V.D., Kim, K.H., 2009. A dispatching method for automated lifting vehicles in automated port container terminals. Computers & Industrial Engineering 56, 1002–1020. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2008.09.009>
- Obrer Marco, R., 2016. Nueva determinación de la capacidad de muelles en terminales de contenedores mediante técnicas de simulación. Universitat Politècnica de València, Valencia (Spain). <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/61663>



- Park, T., Choe, R., Hun Kim, Y., Ryel Ryu, K., 2011. Dynamic adjustment of container stacking policy in an automated container terminal. *International Journal of Production Economics* 133, 385–392. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2010.03.024>
- Park, T., Choe, R., Ok, S.M., Ryu, K.R., 2010. Real-time scheduling for twin RMGs in an automated container yard. *OR Spectrum* 32, 593–615. <https://doi.org/10.1007/s00291-010-0209-0>
- Rashidi, H., Tsang, E.P.K., 2011. A complete and an incomplete algorithm for automated guided vehicle scheduling in container terminals. *Computers & Mathematics with Applications* 61, 630–641. <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2010.12.009>
- RCMS Working Group, 2015. Rethinking Container Management System. Qualitative Comparison.
- Rintanen, K., Thomas, A., 2016. Container Terminal Automation.
- Rodrigue, J.-P., 2013. The geography of transport systems, 3rd ed.. ed. Routledge, London ; New York.
- Rost, P., Breitbach, M., Roreger, H., Erman, B., Mannweiler, C., Miller, R., Viering, I., 2018. Customized Industrial Networks: Network Slicing Trial at Hamburg Seaport. *IEEE Wireless Communications* 25, 48–55. <https://doi.org/10.1109/MWC.2018.1800045>
- Roy, D., de Koster, R., 2018. Stochastic modeling of unloading and loading operations at a container terminal using automated lifting vehicles. *European Journal of Operational Research* 266, 895–910. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.10.031>
- Schmidt, J., Meyer-Barlag, C., Eisel, M., Kolbe, L.M., Appelrath, H.-J., 2015. Using battery-electric AGVs in container terminals — Assessing the potential and optimizing the economic viability. *Research in Transportation Business & Management* 17, 99–111. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2015.09.002>
- Siemens, 2015. As if by magic / Reliability thanks to wireless communication 4.
- Siemens to Automate Eight ARTGs for Felixstowe, 2018. . Port Technology International. URL <https://www.porttechnology.org/news/siemens-to-automate-eight-artgs-for-felixstowe/> (accessed 7.26.19).
- Skinner, B., Yuan, S., Huang, S., Liu, D., Cai, B., Dissanayake, G., Lau, H., Bott, A., Pagac, D., 2013. Optimisation for job scheduling at automated container terminals using genetic algorithm. *Computers & Industrial Engineering* 64, 511–523. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2012.08.012>



SMS group GmbH, 2018. World's first high bay container storing system to be ready for 2020 World Expo in Dubai | Press Detail | SMS group [WWW Document]. URL <https://www.sms-group.com/press-media/press-releases/press-detail/worlds-first-high-bay-container-storing-system-to-be-ready-for-2020-world-expo-in-dubai-1071/> (accessed 3.17.19).

Speer, U., Fischer, K., 2017. Scheduling of Different Automated Yard Crane Systems at Container Terminals. *Transportation Science* 51, 305–324. <https://doi.org/10.1287/trsc.2016.0687>

Stahlbock, R., Voß, S., 2007. Operations research at container terminals: a literature update. *OR Spectrum* 30, 1–52. <https://doi.org/10.1007/s00291-007-0100-9>

Taiwan Port Group, 2018. 臺灣港群自營碼頭管理新里程-封面故事 - 臺灣港務股份有限公司-臺灣港群電子報 [WWW Document]. URL http://epaper.twport.com.tw/?act=epaper&cmd=detail&ad_id=20190423010&ad_qd_id=20180211003&ad_qd_id2=20190506001 (accessed 7.27.19).

The Port of Virginia, 2019. The Port of Virginia [WWW Document]. The Port of Virginia. URL <http://www.portofvirginia.com/> (accessed 7.27.19).

Tongzon, J., Heng, W., 2005. Port privatization, efficiency and competitiveness: Some empirical evidence from container ports (terminals). *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 39, 405–424. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2005.02.001>

TTS, n.d. Casette Systems for Container Terminals [WWW Document]. URL http://www.ttsgroup.com/Global/CasetteSystems_ContainerTerminals_v4.pdf?epslanguage=en (accessed 7.16.19).

TTS Marine, n.d. Product Specification. C-AGV. URL <http://www.ttsgroup.com/Global/C-AGV.pdf?epslanguage=en>

UNCTAD, n.d. UNCTADstat - Table view - Container port throughput, annual, 2010-2017 [WWW Document]. URL <https://unctadstat.unctad.org/wds/TableViewer/tableView.aspx?ReportId=13321> (accessed 1.30.19).

UNITED NATIONS CONFERENCE ON TRADE AND DEVELOPMENT, 2019. REVIEW OF MARITIME TRANSPORT 2018. UNITED NATIONS, S.I.

Vieira Gonçalves de Souza, P., Sapiña García, R., Giménez Maldonado, J.A., Jiménez Zaragoza, M.C., Monfort Mulinas, A., Monterde Higuero, N., Martín-Soberón, A.M., Calduch Verduch, J.D., 2011. Eficont, Guía de eficiencia energética en terminales portuarias de contenedores. Fundación Valenciaport.



- Vis, I.F.A., 2006. Survey of research in the design and control of automated guided vehicle systems. *European Journal of Operational Research* 170, 677–709. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.09.020>
- Vis, I.F.A., Harika, I., 2004. Comparison of vehicle types at an automated container terminal. *OR Spectrum* 26, 117–143. <https://doi.org/10.1007/s00291-003-0146-2>
- Wei Wang, Shidong Fan, 2009. RFID technology application in container transportation, in: 2009 Joint Conferences on Pervasive Computing (JCPC). Presented at the 2009 Joint Conferences on Pervasive Computing (JCPC), pp. 639–642. <https://doi.org/10.1109/JCPC.2009.5420106>
- WorldCargo News, n.d. DP World unveils new yard system [WWW Document]. WorldCargo News. URL <https://www.worldcargonews.com/news/news/dp-world-unveils-new-yard-system--61269> (accessed 7.2.19).
- Xin, J., Negenborn, R.R., Corman, F., Lodewijks, G., 2015. Control of interacting machines in automated container terminals using a sequential planning approach for collision avoidance. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 60, 377–396. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.09.002>
- Xin, J., Negenborn, R.R., Lodewijks, G., 2014. Energy-aware control for automated container terminals using integrated flow shop scheduling and optimal control. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 44, 214–230. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2014.03.014>
- Yan, R., Dunnett, S.J., Jackson, L.M., 2018. Novel methodology for optimising the design, operation and maintenance of a multi-AGV system. *Reliability Engineering & System Safety* 178, 130–139. <https://doi.org/10.1016/j.res.2018.06.003>
- Yan, W., Zhu, Y., He, J., 2014. Performance Analysis of a New Type of Automated Container Terminal. *International Journal of Hybrid Information Technology* 7.
- Yang, Y., Zhong, M., Dessouky, Y., Postolache, O., 2018a. An integrated scheduling method for AGV routing in automated container terminals. *Computers & Industrial Engineering* 126, 482–493. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.10.007>
- Yang, Y., Zhong, M., Yao, H., Yu, F., Fu, X., Postolache, O., 2018b. Internet of things for smart ports: Technologies and challenges. *IEEE Instrum. Meas. Mag.* 21, 34–43. <https://doi.org/10.1109/MIM.2018.8278808>
- Yu, M., Qi, X., 2013. Storage space allocation models for inbound containers in an automatic container terminal. *European Journal of Operational Research* 226, 32–45. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.10.045>



- Zaghdoud, R., Mesghouni, K., Dutilleul, S.C., Zidi, K., Ghedira, K., 2016. A Hybrid Method for Assigning Containers to AGVs in Container Terminal. IFAC-PapersOnLine 49, 96–103. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.017>
- Zaghdoud, R., Mesghouni, K., Dutilleul, S.C., Zidi, K., Ghedira, K., 2012. Optimization Problem of Assignment Containers to AIVs in a Container Terminal. IFAC Proceedings Volumes 45, 274–279. <https://doi.org/10.3182/20120912-3-BG-2031.00057>
- Zhang, X., Zeng, Q., Sheu, J.-B., 2019. Modeling the productivity and stability of a terminal operation system with quay crane double cycling. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review 122, 181–197. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2018.12.003>
- Zheng, K., Lu, Z., Sun, X., 2010. An Effective Heuristic for the Integrated Scheduling Problem of Automated Container Handling System Using Twin 40' Cranes, in: 2010 Second International Conference on Computer Modeling and Simulation. Presented at the 2010 Second International Conference on Computer Modeling and Simulation (ICCMS), IEEE, Sanya, China, pp. 406–410. <https://doi.org/10.1109/ICCMS.2010.290>