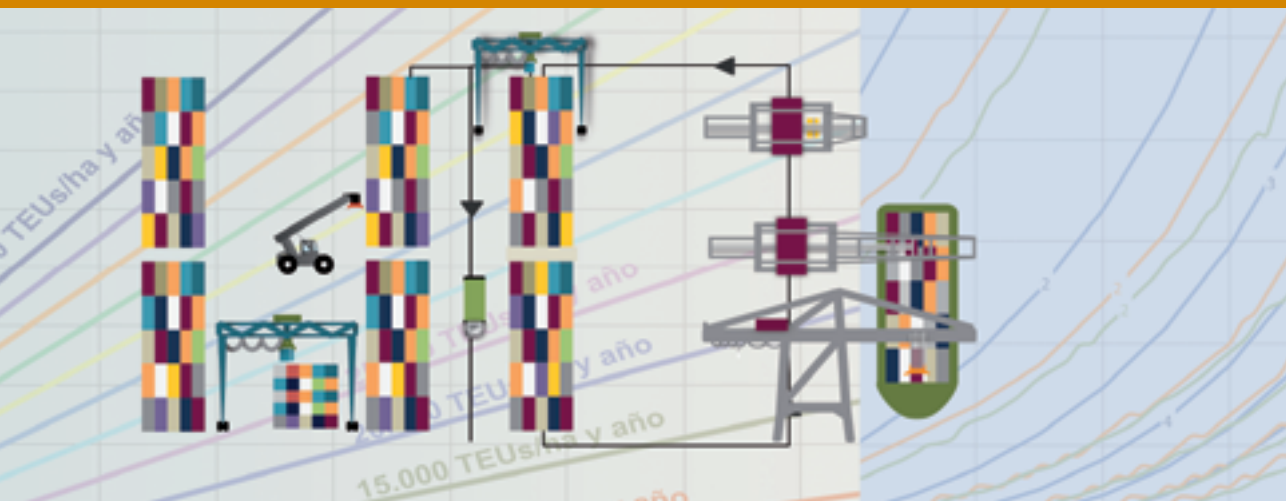
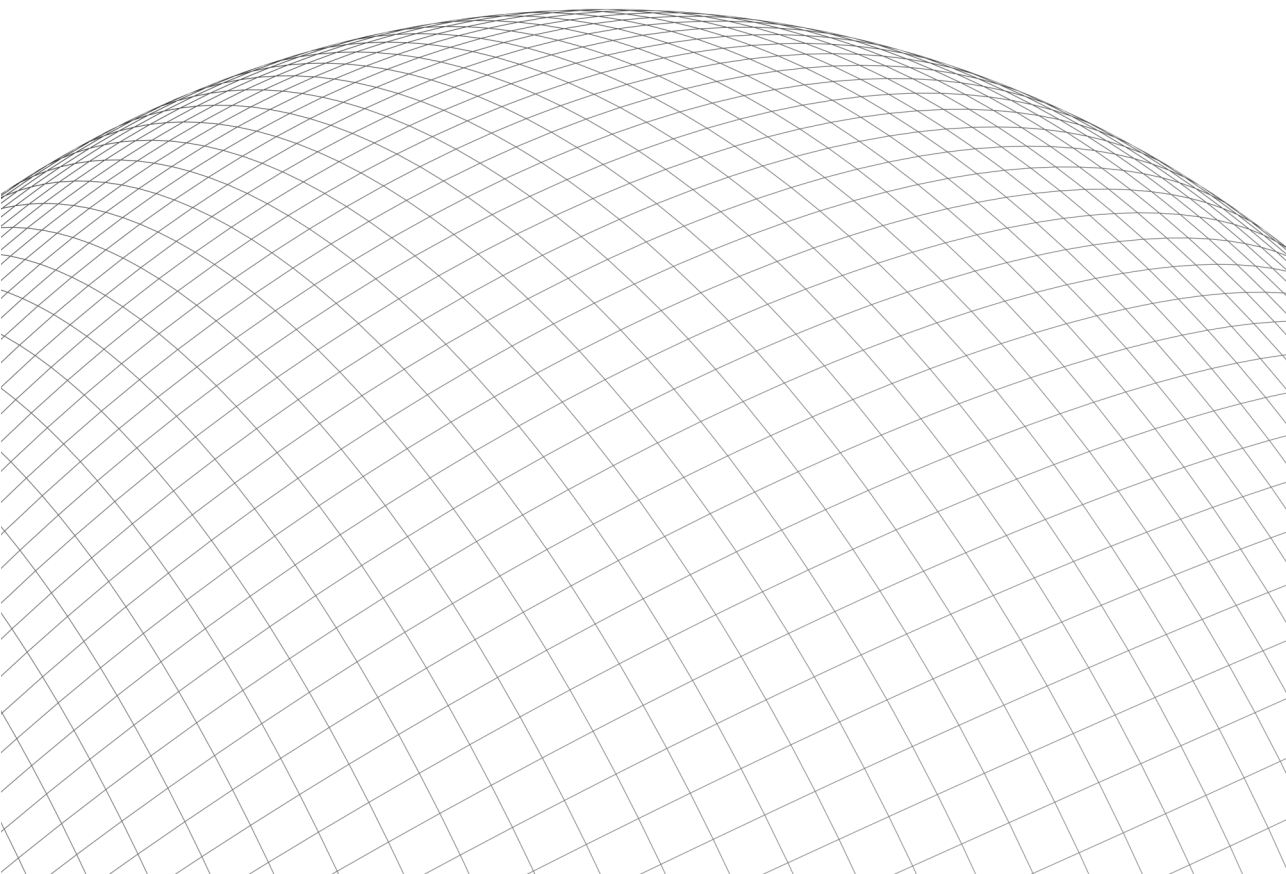


*Manual de capacidad portuaria:
aplicación a terminales de contenedores*



Arturo Monfort
José Aguilar
Paula Vieira
Noemí Monterde
Rosier Obrer
David Calduch
Ana María Martín
Rafael Sapiña

*Manual de capacidad portuaria:
aplicación a terminales de contenedores*



- Autores:** Arturo Monfort Mulinas
José Aguilar Herrando
Paula Vieira Gonçalves de Souza
Noemí Monterde Higuero
Roser Obrer Marco
David Calduch Verduch
Ana María Martín Soberón
Rafael Sapiña García
- Colaboradores:** Elisabet Maroñas Mira
- Colección:** Biblioteca Técnica de la Fundación VALENCIAPORT
- Serie:** Planificación y Gestión Portuaria
- Edita:** © Fundación VALENCIAPORT
Nuevo Edificio Autoridad Portuaria de Valencia
Avda. del Muelle del Turia, s/n – 46024 Valencia
www.fundacion.valenciaport.com
ISBN: 978-84-938155-6-1
Depósito Legal: V-3694-2011
- Imprime:** La Imprenta Comunicación Gráfica
- Maquetación:**  Calígrama
- Fotografía:** Ana María Martín Soberón
David Calduch Verduch
Paula Vieira Gonçalves de Souza
Noemí Monterde Higuero
M^a Carmen Jiménez Zaragoza

Índice

Índice de tablas	6
Índice de figuras	9
Índice de gráficos	12
Siglas y abreviaturas	14
Notación	16
Agradecimientos	19
1. Introducción	23
2. La terminal portuaria	39
2.1 La terminal como sistema	39
2.2 Tipología de terminales portuarias	42
2.2.1 Terminales según la forma de presentación y manipulación de las mercancías	43
2.2.2 Terminales según su tráfico	65
3. Terminales de contenedores	69
3.1. Tipología de terminales de contenedores según el equipo de patio	70
3.1.1. Plataformas o chasis	70
3.1.2. Carretillas	72
3.1.3. <i>Reachstackers</i> (Carretillas de brazo telescópico)	73
3.1.4. <i>Straddle Carriers</i> (SC)	77
3.1.5. <i>Rubber Tyred Gantry cranes</i> (RTG)	78
3.1.6. <i>Rail Mounted Gantry cranes</i> (RMG)	80
3.1.7. Terminales automatizadas	81
3.2. Descripción operativa	84
4. La medición del rendimiento operacional, la eficiencia, la capacidad y el nivel de servicio	91
4.1. La medición del rendimiento en los puertos	91
4.2. Rendimiento operacional	97
4.2.1. Producción	98
4.2.2. Productividad	99
4.2.3. Utilización	102

4.3. Eficiencia	102
4.4. Capacidad	104
4.5. Nivel de servicio	105
5. Medición de la capacidad de las terminales portuarias	111
5.1. Métodos de medición	111
5.2. El cálculo analítico por subsistemas: hipótesis	113
5.3. Capacidad por línea de atraque	115
5.3.1. Definición	115
5.3.2. Recomendaciones sobre capacidad por línea de atraque	120
5.4. Capacidad de almacenamiento	145
5.4.1. Definición	145
5.4.2. Particularización para las terminales de contenedores	146
6. Ejemplos de cálculos de capacidad	181
6.1. Enunciado y datos de partida de las nuevas terminales portuarias de contenedores	181
6.2. Cálculo de capacidad por línea de atraque	185
6.3. Cálculo de capacidad de almacenamiento	197
6.4. Capacidad limitante de la terminal	205
Anexo 1: Observaciones y limitaciones de la formulación de la capacidad por línea de atraque	209
Anexo 2: Resguardos en planta en la línea de atraque	221
Anexo 3: Capacidad anual por metro de línea de atraque para atraques de 250 y 350 metros	223
Anexo 4: Estimación de la productividad anual media de buque atracado	239
Bibliografía	247

Índice de tablas

Tabla 1:	Clasificación de mercancía general y su forma de presentación	43
Tabla 2:	Forma de manipulación según la forma de presentación de las mercancías	44
Tabla 3:	Resumen de tipología de carretillas	76
Tabla 4:	Caracterización de la operativa de la terminal según tipología de equipamiento de patio empleada	83
Tabla 5:	<i>Decoupling</i> en el sistema de interconexión	87
Tabla 6:	Equipos de interconexión entre los distintos subsistemas en función del equipo de patio	89
Tabla 7:	Indicadores operacionales y financieros	93
Tabla 8:	Categorías e indicadores de rendimiento portuario	94
Tabla 9:	Categorías de medición, indicadores tipo y unidades	97
Tabla 10:	Ejemplos de mediciones de productividad	101
Tabla 11:	Conexión principal entre indicadores de productividad y objetivos	101
Tabla 12:	Propuesta de NdS para terminales intermodales	109
Tabla 13:	Capacidad de la línea de atraque según tipos de atraque (análisis “caso Chile”)	118
Tabla 14:	Ejemplo de la influencia de la caracterización del sistema y del nº de atraques en la tasa de ocupación para cierto nivel de calidad de servicio asociada a la espera relativa	122
Tabla 15:	Recomendaciones para la tasa de ocupación admisible (Φ) en función del número de atraques y del sistema para terminales polivalentes ($T_e/T_s = 0,25$) y terminales de graneles ($T_e/T_s = 0,50$)	127
Tabla 16:	Recomendaciones para la tasa de ocupación admisible (Φ) en función del número de atraques y del sistema para terminales de contenedores ($T_e/T_s=0,05$; $T_e/T_s=0,10$ y $T_e/T_s=0,20$)	128
Tabla 17:	Ejemplos de valores de indicadores de rendimiento para un contrato de terminal de contenedores	129
Tabla 18:	Recomendaciones sobre productividad y niveles de servicio	130
Tabla 19:	Capacidad de terminales de contenedores por línea de atraque en función del tamaño de la terminal y de la caracterización del tráfico	131
Tabla 20:	Capacidad anual por metro de línea de atraque en función del tipo de tráfico, de la productividad de buque atracado y del número de atraques, para atraques de 300 metros	132
Tabla 21:	Relación entre tamaño de escala y productividad	134

Tabla 22:	Propuesta de niveles de servicio para el subsistema de carga y descarga de buques o de línea de atraque	142
Tabla 23:	Niveles de servicio para el caso $M/E_4/2$ y atraque de 300 m (Productividad por línea de atraque en contenedores/metro)	143
Tabla 24:	Niveles de servicio para el caso $M/E_4/2$ y atraque de 300 m (Productividad por línea de atraque en TEUs/metro)	143
Tabla 25:	Cuadro resumen de indicadores de productividad por superficie de algunas terminales de contenedores internacionales	166
Tabla 26:	Densidad superficial según autor y equipo de almacenamiento	167
Tabla 27:	Valores de la capacidad estática de almacenamiento del patio de contenedores según el equipo	170
Tabla 28:	Densidad superficial de almacenamiento según sistema de patio	172
Tabla 29:	Densidad del sistema –internalizando la altura de apilado– según autor y tipo de equipo de almacenamiento	174
Tabla 30:	Densidad superficial, altura operativa media de apilado y capacidad estática de las terminales de contenedores según el tipo de equipo de almacenamiento	176
Tabla 31:	Datos físicos y operativos de la Terminal de Contenedores tipo (TP y TD) de la Dársena Sur del Puerto de Valle Verde	183
Tabla 32:	Productividad de buque mínima a lo largo de la concesión de una terminal pública	186
Tabla 33:	Capacidad por línea de atraque de la TP de la Dársena Sur para una productividad de 40 contenedores/hora	188
Tabla 34:	Capacidad por línea de atraque de la TP de la Dársena Sur para productividades de 44 y 48 contenedores/hora	188
Tabla 35:	Productividad de buque mínima a lo largo de la concesión de una terminal dedicada (TD)	191
Tabla 36:	Capacidad por línea de atraque de la TD ($E_2/E_4/n$) de la Dársena Sur para una productividad de 70 contenedores/hora	192
Tabla 37:	Capacidad por línea de atraque de la TD ($E_2/E_4/n$) de la Dársena Sur para productividades de 65 y 75 contenedores/hora	192
Tabla 38:	Capacidad por línea de atraque de la TD ($M/E_4/n$) de la Dársena Sur para una productividad de 70 contenedores/hora	194
Tabla 39:	Capacidad por línea de atraque de la TD ($M/E_4/n$) de la Dársena Sur para productividades de 65 y 75 contenedores/hora	194
Tabla 40:	Capacidad de almacenamiento de la TP	199

Tabla 41:	Capacidad de almacenamiento de la TD	199
Tabla 42:	Capacidad de almacenamiento de la TP – Gráfico 6	203
Tabla 43:	Capacidad de almacenamiento de la TD – Gráfico 6	203
Tabla 44:	Capacidad de almacenamiento de la TP y la TD de la Dársena Sur en función de los días de estancia	205
Tabla 45:	Capacidad anual por metro de línea de atraque en función del tipo de tráfico, de la productividad anual media de buque atracado y del número de atraques – para atraques de 250 metros de longitud	224
Tabla 46:	Capacidad anual por metro de línea de atraque en función del tipo de tráfico, de la productividad anual media de buque atracado y del número de atraques – para atraques de 350 metros de longitud	231
Tabla 47:	Ejemplo de cálculo de la productividad anual media de buque atracado (P)	242
Tabla 48:	Cálculo de la productividad anual media de buque atracado (P) para las terminales tipo de Ashar (2009) a partir de la productividad por línea de atraque	243
Tabla 49:	Cálculo de la productividad anual media de buque atracado (P) del rango 500-1.000 de Drewry (2002 y 2010) para las terminales tipo de Ashar (2009) y comparación	244
Tabla 50:	Comparación entre el incremento de capacidad resultado de elevar la productividad anual media de buque atracado o de pasar de 2 a 3 atraques	245

Índice de figuras

Figura 1:	Puerto de Valencia. Dársena interior. 1910 ca	27
Figura 2:	Puerto de Valencia. 1920 ca	27
Figura 3:	Muelle para mercancía general. Años 60-70	29
Figura 4:	Terminal (“torres” de descarga) de minerales de Cleveland	30
Figura 5:	Buque Tíber de Sea-Land. Primera escala en Valencia atendida por la grúa Liebherr de la terminal de Marítima Valenciana. 1972	31
Figura 6:	Primera grúa de contenedores en el Puerto de Valencia: la “Liebherr” en la “miniterminal”. 1972	32
Figura 7:	Ejemplo de subsistemas de una terminal de contenedores	41
Figura 8:	Terminal de granel líquido Horizon Singapore Terminals (Jurong Island - Singapur)	45
Figura 9:	Terminal <i>offshore</i> con boya de SBM	46
Figura 10:	Ejemplo de <i>layout</i> de una terminal de granel líquido	47
Figura 11:	Terminal portuaria de granel sólido El Musel (Puerto de Gijón - España)	48
Figura 12:	Terminal portuaria de granel sólido CHS (Puerto de Duluth - EE.UU.)	49
Figura 13:	Sistema de tolva y cuchara en El Musel (Puerto de Gijón - España)	50
Figura 14:	Instalación especial “Medusa” de descarga de granel (A Coruña - España)	52
Figura 15:	Ejemplo de <i>layout</i> de una terminal de granel sólido	54
Figura 16:	Terminal de mercancía general Marítima Candina (Bilbao - España)	55
Figura 17:	Ejemplo de <i>layout</i> de una terminal de mercancía general convencional	56
Figura 18:	Terminal Ro-Ro de vehículos Carport Sagunto - Bergé (Puerto de Sagunto - España)	57
Figura 19:	Disposiciones de muelle de una terminal Ro-Ro	58
Figura 20:	Ejemplo de <i>layout</i> de una terminal Ro-Ro	59
Figura 21:	Noatum Container Terminal Valencia (Valencia - España)	61
Figura 22:	Ejemplo de <i>layout</i> de una terminal de contenedores	62
Figura 23:	Terminal polivalente Tisur (Puerto de Matarani - Perú)	64
Figura 24:	Ejemplo de <i>layout</i> de una terminal polivalente	65
Figura 25:	California United Terminal (Port of Long Beach - EE.UU.)	71
Figura 26:	Ejemplos de <i>reachstackers</i>	74
Figura 27:	Terminal P. Castellón (Puerto de Castellón - España)	75
Figura 28:	<i>Straddle carrier</i> y su correspondiente patio	77
Figura 29:	Patio de RTGs, Noatum Container Terminal Valencia (Valencia - España)	79

Figura 30:	RMGs automáticos (ASCs), APM Terminals Virginia (Port of Virginia - EE.UU.)	82
Figura 31:	Relación entre equipos (grúas de muelle, camiones internos y externos y RTGs)	86
Figura 32:	Propuesta de Mapa Estratégico para una terminal	92
Figura 33:	Esquema del conflicto de intereses en la terminal portuaria	96
Figura 34:	Definiciones de tiempos en el subsistema de carga/descarga	100
Figura 35:	Matriz básica de dimensiones de medición del rendimiento	103
Figura 36:	Capacidad de la terminal portuaria por subsistemas	113
Figura 37:	Capacidad por línea de atraque de las terminales portuarias	119
Figura 38:	Capacidad de almacenamiento de las terminales de contenedores	151
Figura 39:	Distintas configuraciones del área de almacenamiento según la tipología de la terminal	153
Figura 40:	Área de patio de plataformas en Global Gateway South (Los Ángeles - EE.UU.)	154
Figura 41:	Área de patio de plataformas en California United Terminals (Long Beach - EE.UU.)	155
Figura 42:	Área de patio de <i>reachstackers</i> en Terminal P. Castellón (Castellón - España)	156
Figura 43:	Área de patio de <i>reachstackers</i> en Puerto Quetzal (San José - Guatemala)	157
Figura 44:	Área de patio de <i>reachstackers</i> en San Antonio Terminal Internacional (San Antonio - Chile)	158
Figura 45:	Área de patio de <i>Straddle carriers</i> en TCB, S.L. (Barcelona - España)	158
Figura 46:	Área de patio de <i>Straddle carriers</i> en Eurogate Container Terminal (Hamburgo - Alemania)	159
Figura 47:	Área de patio de RTGs (6+1) en Noatum Container Terminal Valencia (Valencia - España)	159
Figura 48:	Área de patio de RTGs (6+1) en MSC Terminal Valencia (Valencia - España)	160
Figura 49:	Área de patio de RTGs (6+1) en Terminal Darsena Toscana (Livorno - Italia)	161
Figura 50:	Área de patio de RTGs (7+1) en TECON Santos (Santos - Brasil)	161
Figura 51:	Área de patio de RTGs (8+1) en Brani Terminal (Brani - Singapur)	162
Figura 52:	Área de patio de RMGs (9) en London Thamesport (Londres - Reino Unido)	163

Figura 53:	Área de patio de RMGs (8) en APM Terminals Virginia (Norfolk - Estados Unidos)	164
Figura 54:	Área de patio de RMGs (9) en Antwerp Gateway Terminal-DP World (Amberes - Bélgica)	165
Figura 55:	Ejemplo de <i>layout</i> del área de almacenamiento de una terminal con RTG (6 de ancho, 1 sobre 4)	168
Figura 56:	Ejemplo de <i>layout</i> del área de almacenamiento de una terminal con RMG (9 de ancho, 1 sobre 4)	168
Figura 57:	Terminal de Contenedores tipo (TP y TD) - Puerto Valle Verde	182
Figura 58:	Cálculo de la productividad anual media de buque atracado (P)	240

Índice de gráficos

Gráfico 1: Espera relativa (T_e/T_s) y tasa de ocupación en función del sistema ($M/E_4/n$ y $E_2/E_4/n$) para 1, 2 y 3 atraques	123
Gráfico 2: Correspondencia de las tasas de ocupación y la espera relativa de los sistemas $M/M/n$ y $M/E_2/n$ y $M/E_4/n$ de 1 a 6 atraques	125
Gráfico 3: Correspondencia de las tasas de ocupación y la espera relativa de los sistemas $E_2/E_2/n$ $E_2/E_4/n$ de 1 a 6 atraques	126
Gráfico 4: Capacidad anual por línea de atraque de un sistema $M/E_4/n$ y espera relativa de 0,05 para atraques de 300 m	135
Gráfico 5: Capacidad anual por línea de atraque de un sistema $E_2/E_4/n$ y espera relativa de 0,05 para atraques de 300 m	136
Gráfico 6: Capacidad anual por línea de atraque de un sistema $M/E_4/n$ y espera relativa de 0,1 para atraques de 300 m	137
Gráfico 7: Capacidad anual por línea de atraque de un sistema $E_2/E_4/n$ y espera relativa de 0,1 para atraques de 300 m	138
Gráfico 8: Capacidad anual por línea de atraque de un sistema $M/E_4/n$ y espera relativa de 0,2 para atraques de 300 m	139
Gráfico 9: Capacidad anual por línea de atraque de un sistema $E_2/E_4/n$ y espera relativa de 0,2 para atraques de 300 m	140
Gráfico 10: Niveles de servicio para el caso $M/E_2/n$ para $n=2$ y $n=3$ con atraques de 300 m	144
Gráfico 11: Capacidad anual de almacenamiento (TEUs/ha año) en función de la densidad de almacenamiento y de los días de estancia	177
Gráfico 12: Capacidad estática del equipo de patio como resultado de las necesidades de capacidad anual y de los días de estancia	178
Gráfico 13: Previsión de tráfico de las terminales tipo TP y TD Dársena Sur Puerto de Valle Verde	184
Gráfico 14: Comparación de la capacidad por línea de atraque de la TP con la previsión de tráfico	189
Gráfico 15: Comparación de la capacidad por línea de atraque de la TD ($E_2/E_4/n$) con la previsión de tráfico	193
Gráfico 16: Comparación de la capacidad por línea de atraque de la TD ($M/E_4/n$) con la previsión de tráfico	195
Gráfico 17: Evolución de la capacidad por línea de atraque de la TP y la TD respecto a los niveles de servicio ($M/E_4/n$)	196
Gráfico 18: Comparación capacidades de almacenamiento para RTGs y SCs en la TP (15% de transbordo) con la previsión de tráfico	200

Gráfico 19: Comparación capacidades de almacenamiento para RTGs y SCs en la TD (75% de transbordo) con la previsión de tráfico	201
Gráfico 20: Capacidad limitante en la TP para $T_e/T_s=0,20$	206
Gráfico 21: Capacidad limitante en la TD ($M/E_4/n$) para $T_e/T_s=0,10$	207
Gráfico 22: Variabilidad natural de la tasa de ocupación. El caso $M/E_4/4$	210
Gráfico 23: Superposición de curvas en los sistemas $M/E_K/4$, para K entre 4 y 7	211
Gráfico 24: Correspondencia de las tasas de ocupación con la espera relativa de los sistemas $M/E_4/n$, para n entre 5 y 6, con esloras constantes	216
Gráfico 25: Mejora de las tasas de ocupación	218
Gráfico 26: Empeoramiento de las tasas de ocupación	219
Gráfico 27: Capacidad anual por línea de atraque de un sistema $M/E_4/n$ y espera relativa de 0,05 para atraques de 250 m	225
Gráfico 28: Capacidad anual por línea de atraque de un sistema $E_2/E_4/n$ y espera relativa de 0,05 para atraques de 250 m	226
Gráfico 29: Capacidad anual por línea de atraque de un sistema $M/E_4/n$ y espera relativa de 0,10 para atraques de 250 m	227
Gráfico 30: Capacidad anual por línea de atraque de un sistema $E_2/E_4/n$ y espera relativa de 0,10 para atraques de 250 m	228
Gráfico 31: Capacidad anual por línea de atraque de un sistema $M/E_4/n$ y espera relativa de 0,20 para atraques de 250 m	229
Gráfico 32: Capacidad anual por línea de atraque de un sistema $E_2/E_4/n$ y espera relativa de 0,20 para atraques de 250 m	230
Gráfico 33: Capacidad anual por línea de atraque de un sistema $M/E_4/n$ y espera relativa de 0,05 para atraques de 350 m	232
Gráfico 34: Capacidad anual por línea de atraque de un sistema $E_2/E_4/n$ y espera relativa de 0,05 para atraques de 350 m	233
Gráfico 35: Capacidad anual por línea de atraque de un sistema $M/E_4/n$ y espera relativa de 0,10 para atraques de 350 m	234
Gráfico 36: Capacidad anual por línea de atraque de un sistema $E_2/E_4/n$ y espera relativa de 0,10 para atraques de 350 m	235
Gráfico 37: Capacidad anual por línea de atraque de un sistema $M/E_4/n$ y espera relativa de 0,20 para atraques de 350 m	236
Gráfico 38: Capacidad anual por línea de atraque de un sistema $E_2/E_4/n$ y espera relativa de 0,20 para atraques de 350 m	237
Gráfico 39: Relación entre el número de movimientos y la productividad bruta de atraque de los buques (muestra del Puerto de Valencia, año 2010)	241

Siglas y abreviaturas

€	Euro
AGV	<i>Automated Guided Vehicle</i> (Vehículo Guiado Automáticamente)
AP	Autoridad Portuaria
APVV	Autoridad Portuaria de Valle Verde (ficticia)
ASC	<i>Automated Stacking Crane</i>
ca.	<i>Circa</i> . Alrededor o cerca (indica fecha o valor aproximado)
cont.	Contenedor
CMI	Cuadro de Mando Integral (<i>Balanced Scorecard, BSC</i>)
CTQI	<i>Container Terminal Quality Indicator</i> (marca registrada <i>Germanischer Lloyd</i>)
DEA	<i>Data Envelopment Analysis</i> (Análisis envolvente de datos)
DGMM	Dirección General de la Marina Mercante (España)
DRMG	<i>Double Rail Mounted Gantry crane</i>
EE	Empresa Estibadora
ESPO	<i>European Sea Ports Organisation</i>
FFCC	Ferrocarril
FLT	<i>Fork Lift Truck</i>
FV	Fundación Valenciaport
GT	<i>Gross tonnage</i> (Arqueo bruto)
h	Hora
ha	Hectárea
KPIs	<i>Key Performance Indicators</i> (Indicadores Clave de Rendimiento)
Lo-Lo	<i>Lift on – Lift off</i>
m	Metro
m.l.	Metro lineal
MASPORT	Proyecto “Metodologías de Automatización y Simulación para la Evaluación y Mejora de la Capacidad, Rendimiento y Nivel de Servicio de Terminales Portuarias de Contenedores”
MFOM	Ministerio de Fomento (España)
MOPT	Ministerio de Obras Públicas y Turismo (España)
mov	Movimiento
n	Número de atraques
n.p.	No procede

NdS	Nivel de Servicio
NV	<i>Naamloze vennootschap</i> (equivalente a la S.A. española; o a Public Limited Company en Reino Unido)
O/D	Tráfico Origen/Destino terrestre (<i>hinterland</i>)
OHBC	<i>Over-Head Bridge Crane</i>
OM	Operación Marítima
OPPE	Organismo Público Puertos del Estado (España)
OT	Operación Terrestre
PPRISM	Proyecto " <i>Port Performance Indicators, Selection and Measurement</i> "
R/E	Recepción y Entrega
RMG	<i>Rail Mounted Gantry crane</i>
Ro-Pax	<i>Roll on-Roll off</i> y pasajeros
Ro-Ro	<i>Roll on – Roll off</i>
ROM	"Recomendaciones para Obras Marítimas"
RS	<i>Reachstacker</i>
RTG	<i>Rubber Tyred Gantry crane</i>
S.A.	Sociedad Anónima
SC	<i>Straddle carrier</i>
ShC	<i>Shuttle Carrier</i>
S.L.	Sociedad Limitada
SLU	Sociedad Limitada Unipersonal
t	tonelada
T + P	Cabeza Tractora + Plataforma
TB	Tráfico de transbordo (tránsito marítimo)
TC	Terminales de contenedores
TD	Terminal Dedicada
TEU	<i>Twenty-foot Equivalent Unit</i>
TIC	Tecnologías de la Información y la Comunicación
TOS	<i>Terminal Operating System</i> (Sistema Operativo de la Terminal, SOT)
TP	Terminal Pública
Ud	Unidad
UNCTAD	<i>United Nations Conference on Trade and Development</i>

Notación

α_o	Coefficiente de almacenamiento neto
ε	Espera relativa
Φ	Tasa de ocupación admisible
A_i	Área o superficie de almacenamiento correspondiente al tipo de tráfico i
A_p	Área de almacenamiento o de patio
A_{PN}	Área de almacenamiento neta
A_T	Área total de la terminal
C_{LA}	Capacidad anual de la línea de atraque
C_{pi}	Capacidad de almacenamiento anual correspondiente al tipo de tráfico i
C_p	Capacidad anual de almacenamiento de la terminal de contenedores
$C_{P\text{eq}LA}$	Capacidad anual de almacenamiento equivalente a capacidad anual por línea de atraque
D_p	Densidad superficial de almacenamiento o de patio
D_T	Densidad superficial de la terminal
E_K	Función de distribución Erlang de orden K
g_o	Factor de ocupación o factor punta
h	Altura operativa media de apilado
H	Altura máxima de apilado o altura nominal del equipo
h_i	Factor de apilamiento correspondiente al tipo de tráfico i
H_U/H_V	Altura nominal para contenedores llenos/vacíos
h_{TEU}	Huellas_TEU
K	Factor operacional
K_U/K_V	Factor operacional para contenedores llenos/vacíos
K_{PTB}	Coefficiente de transformación de contenedores de capacidad de patio en contenedores equivalentes de capacidad de línea de atraque
$K_{separación}$	Coefficiente de separación entre buques en la línea de atraque (resguardo de seguridad)
M	Función de distribución exponencial, aleatoria o marcoviana
n	Número de puestos de atraque
P	Productividad anual media de buque atracado
Q	Cuantía de mercancía a mover en una escala en puerto

Q_{mi}	Cuantía media de mercancía a mover del buque i
s_i	Superficie unitaria bruta requerida por el tipo de tráfico i
T_a	Tiempo medio de tránsito o estancia de la mercancía en el área de almacenamiento
$t_{año}$	Horas operativas de la terminal al año
T_e	Tiempo de espera (fondeo)
T_L/T_V	Tiempo de estancia para contenedores llenos/vacíos
T_m	Tiempo de maniobra del buque
T_p	Tiempo de estancia del buque en puerto
T_s	Tiempo de servicio o tiempo de atraque bruto
TB	Tráfico de transbordo

Agradecimientos

El presente manual es el resultado de parte del trabajo desarrollado en el marco del proyecto MASPORT: Metodologías de automatización y simulación para la evaluación y mejora de la capacidad, rendimiento y nivel de servicio de terminales portuarias de contenedores, con financiación del Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica (I+D+i) 2008-2011.

Los autores quieren agradecer al Ministerio de Fomento y al Ministerio de Ciencia e Innovación la confianza que han tenido en el proyecto y en la agrupación encargada de desarrollarlo.

Asimismo los autores quieren agradecer a todos los miembros de la agrupación del Proyecto MASPORT su colaboración y dedicación: TCV Stevedoring Company S.A., MSC Terminal Valencia S.A., la Universidad Politécnica de Valencia y Open Kode S.L.

Finalmente se quiere hacer una especial mención para aquellas personas, empresas e instituciones que han colaborado cediendo material gráfico para ilustrar el manual:

- ARTURO MONFORT MULINAS
- AUTORIDAD PORTUARIA DE A CORUÑA
- AUTORIDAD PORTUARIA DE VALENCIA

Manual de capacidad portuaria: aplicación a terminales de contenedores

- CARPORT SAGUNTO S.L. (GRUPO BERGÉY CIA, SL)
- EUROPEAN BULK HANDLING INSTALLATION, S.A. (E.B.H.I., S.A.)
- FANTUZZI NOELL IBERIA SLU
- HORIZON SINGAPORE TERMINALS PRIVATE LIMITED
- KONECRANES AUSIO SLU
- LIEBHERR-WERK NENZING GMBH
- SBM OFFSHORE N.V.
- SVETRUCK AB
- TERMINAL INTERNACIONAL DEL SUR S.A. (TISUR)

*Que el blanco sea blanco,
que el negro sea negro,
que uno y uno sean dos,
porque exactos son los números,... depende*

*Depende... ¿de qué depende?
de según como se mire, todo depende...*

Jarabe de Palo, 1998



Introducción

El objetivo de esta monografía es presentar una metodología para el cálculo de la capacidad de las terminales portuarias que, particularizada al caso de las terminales de contenedores, pueda emplearse como manual práctico a efectos de la planificación de éstas.

El reto permanente en relación con la planificación de las infraestructuras portuarias se concreta en la configuración y anticipación de una oferta que vaya respondiendo a la evolución del tráfico o demanda en un horizonte de largo plazo, de forma sostenible en términos económicos, sociales y medioambientales. Es lo que acaba reflejándose en el documento conocido como Plan Maestro o Plan Director de Infraestructuras del puerto. Si bien el ejercicio de previsión de la demanda no es sencillo, el de evaluar la capacidad de la oferta resulta mucho más complejo de lo que puede parecer a primera vista.

La planificación y el desarrollo de la oferta deben realizarse desde una visión de sostenibilidad. Se requiere, por un lado, maximizar la utilización de las infraestructuras y las superestructuras existentes; y por otro, desarrollar las que serán necesarias para que, una vez alcanzada la capacidad de las actuales, se disponga de las nuevas. Es un ejercicio que generalmente suscita el debate en relación con aspectos medioambientales y de uso del frente marítimo. Además, la indispensable competitividad de la oferta conformada requiere, en todo momento, unos niveles de servicio aceptables y conocidos, así como su permanente seguimiento y control.

El interés histórico y vigente relativo al estudio y análisis del rendimiento en los puertos responde al desarrollo de diversas funciones de planificación y explotación portuaria. Así, tal ejercicio es necesario, por ejemplo, para:

- La planificación de infraestructuras y superestructuras portuarias (línea de atraque, superficies y equipos), es decir, la planificación de la capacidad de la oferta;
- La mejora de la capacidad de infraestructuras y superestructuras;
- El establecimiento de tarifas de manipulación portuaria; o,
- La mejora de la productividad de infraestructuras y superestructuras.

A la hora de acometer el ejercicio de la previsión de la demanda, desde antiguo se ha venido empleando la técnica denominada de “generación de escenarios”; y en el caso de la oferta, el uso de indicadores de productividad para estimar la línea de atraque y las superficies necesarias. Seguidamente, se realiza un breve recorrido histórico al respecto desde el último cuarto del siglo XIX hasta la actualidad, tomando como hilo conductor el caso del Puerto de Valencia.

Entender el pasado

En 1878, el ingeniero Alejandro Cerdá, director de la Junta de Obras del Puerto de Valencia (1874-1882), en la “Memoria descriptiva del proyecto de distribución de la dársena del puerto”, exponía que a partir de un tráfico de unas 250.000 toneladas en tal año, preveía un crecimiento anual de 50.000 toneladas desde 1883 hasta alcanzar 1.250.000 toneladas 20 años después (en 1903), añadiendo que *“para dicha época en el supuesto de poderse verificar el movimiento de 400 toneladas anuales por cada metro lineal de muelle, sería indispensable una línea de muelles útiles para la carga y descarga de 3.125 metros lineales, y agregando una cuarta parte de esta longitud por las escaleras, ángulos, curvas y demás línea no utilizable resultará necesario un contorno de muelles de 3.750 metros”*.

Por otro lado añadía que *“hemos de insistir en que este dato interesante no es exagerado, pues aunque el aumento de tonelaje del puerto fuese algo menor que el que suponemos, el tipo de 400 toneladas por metro lineal es un máximo, con el que sería difícil el cómodo uso de los muelles”*.

El ingeniero Manuel Maese (1896), director de la Junta de Obras del Puerto de Valencia (1888-1902 y 1918-1924), en la “Memoria del proyecto de los diques exteriores para el

ensanche y mejora del puerto” exponía que “el tráfico anual ha llegado a ser de 753.000 toneladas, y, como desde 1877 a 1891 ha crecido a razón de 38.000 toneladas por año, puede esperarse que dentro de 30 años (en 1921) exceda de 2 millones de toneladas, si no ocurre ninguno de esos fenómenos que alteran profundamente la producción, la riqueza, la manera de ser económica de un país”. El Puerto de Valencia contaba entonces con poco más de 2.000 metros de línea de atraque y Maese razonaba exponiendo que si el rendimiento anual fuera de 300 toneladas por metro lineal, 2 millones de toneladas exigirían cerca de 7.000 metros de línea de atraque, concluyendo que era necesario que las nuevas obras permitieran en el futuro la construcción de hasta 5.000 metros de línea de atraque adicionales.

Efectivamente, a principios del siglo XX la productividad por metro de línea de atraque se situaba en el rango entre las 300 y 400 toneladas. El ingeniero profesor Pedro Pérez de la Sala, en su obra “Puertos y faros” de 1889, recogía algunas referencias internacionales:

“Chevalier deduce del estudio de los principales puertos ingleses, una línea de atraque de un metro para 180 a 430 toneladas, y toma 300 como término medio. Stevenson inserta, en su tratado de puertos, una tabla en la que figuran límites más extensos: el inferior de 154 corresponde a los Docks de Santa Catalina de Londres, y el superior de 477 a Glasgow. En Southampton son 380 y puede holgadamente servir un número mayor. En resumen, cuando el puerto está bien surtido de aparatos para el embarque y desembarque, no se peca de exagerado señalando 400 toneladas a cada metro lineal”.

A lo anterior añadía que “no es sólo la línea de muellaje y el calado lo que debemos tener en cuenta para juzgar la bondad de un puerto; su extensión es también otro dato no menos importante. En la tabla antes citada, que Stevenson publicó, el máximo de 90.000 toneladas por hectárea corresponde a los docks del Tyne y el mínimo de 44.500 a Southampton. De aquí resulta una relación entre la extensión del puerto y la línea de muellaje; en algunos casos, como Génova, Trieste y Marsella, la longitud de muelle por hectárea varía entre 90 y 200. En los puertos de gran movimiento comercial, como Londres, Liverpool, Amberes y Amsterdam, suele, en algunas dársenas, alcanzar hasta 350”.

En 1911, el ingeniero José M^º Fuster, director de la Junta de Obras del Puerto de Valencia (1910-1917), presentaba en la Revista de Obras Públicas que el Puerto de Valencia había alcanzado 1.083.471 toneladas en el año 1909, con una longitud aprovechable de la línea de atraque (ver Figura 1) ligeramente superior a los 2.000 metros lineales por lo que “el movimiento anual por metro lineal de muelle es de 537 toneladas, cifra exorbitante, pues

generalmente se estima que no debe pasar de 300 toneladas y aun de 270, según los estudios de la Comisión italiana encargada de fijar las bases para la construcción de los puertos en aquella nación”. Seguidamente, con un índice de 300 toneladas anuales por metro de línea de muelle estimaba en casi 7.000 metros, como ya lo hiciera anteriormente el ingeniero Maese, los metros necesarios para atender una previsión de tráfico de 2 millones de toneladas en un horizonte de 15 años (1924). En tal año se alcanzó 1.500.000 toneladas prácticamente con la misma línea de muelle.

¿Cómo era posible esa extraordinaria productividad por línea de atraque?

Cabe añadir que la “exorbitante” productividad por línea de atraque se alcanzaba con un equipo moderno mínimo. Así, en 1912, el puerto sólo disponía de 6 grúas eléctricas: 2 de 3 toneladas en el transversal de levante exterior, otras 2 de 3 toneladas en el transversal de poniente exterior y 2 grúas de 15 toneladas: una en el transversal de poniente interior y otra en el contradique de poniente. Asimismo existía el proyecto de incorporar como máximo 4 más, tal y como reclamaba la Cámara de Comercio (2 de 3 toneladas y 2 de 5 toneladas). El propio Fuster reconocía que *“mientras la construcción de las obras de los diques exteriores y nuevos muelles comerciales no avance, no existe suficiente línea de atraque para las embarcaciones, y será imposible el establecimiento de mayor número de grúas”*. Y en particular se refería a la problemática relacionada con el *“embarque de naranjas y frutas del país”*: *“se usa y se abusa de las barcasas, con lo cual se grava mucho el porte de las cajas y mientras no desaparezcan aquellas, existirán los tecles, pues el agente que los posee tiene interés en utilizar éstos. Cuando termine el ensanche del dique de Poniente por el lado del mar y el avance de las obras exteriores proporcione más abrigo en el antepuerto, habrá suficiente línea de atraque, y de esta suerte no quedará excusa para que se coloquen al costado del muelle las embarcaciones”* (Junta de Obras del Puerto de Valencia, 1913).

El “secreto” de la referida productividad estaba en el sistema de embarque y carga mediante el empleo de grúas o cabrias flotantes (denominadas “tecles”, ver Figura 1) o de grúas de muelle (denominadas “caballetes”, ver Figura 2), en todos los casos manuales, y de barcasas. Los buques fondeaban en la dársena, de punta al muelle, y por medio de las barcasas eran cargados empleando los medios propios (grúas y puntales) de los buques. Si bien las cifras de productividad resultaban excelentes, el problema era el mayor coste citado por el ingeniero director, como resultado de la doble manipulación.

Figura 1. Puerto de Valencia. Dársena interior. 1910 ca.



Fuente: Autoridad Portuaria de Valencia

Figura 2. Puerto de Valencia. 1920 ca.



Fuente: Autoridad Portuaria de Valencia

Los dos millones de toneladas se alcanzaron en el año 1929 pero con mucha más línea de atraque por cuanto que la finalización de las obras exteriores, proyectadas 35 años antes por el ingeniero Maese, permitió la disposición en 1931 de 1.300 metros adicionales de línea de atraque en los muelles de Levante y Poniente. Lamentablemente, luego vendría la guerra civil española y la Segunda Guerra Mundial, de modo que la recuperación del nivel de tráfico de los dos millones de toneladas no se produjo hasta el año 1958.

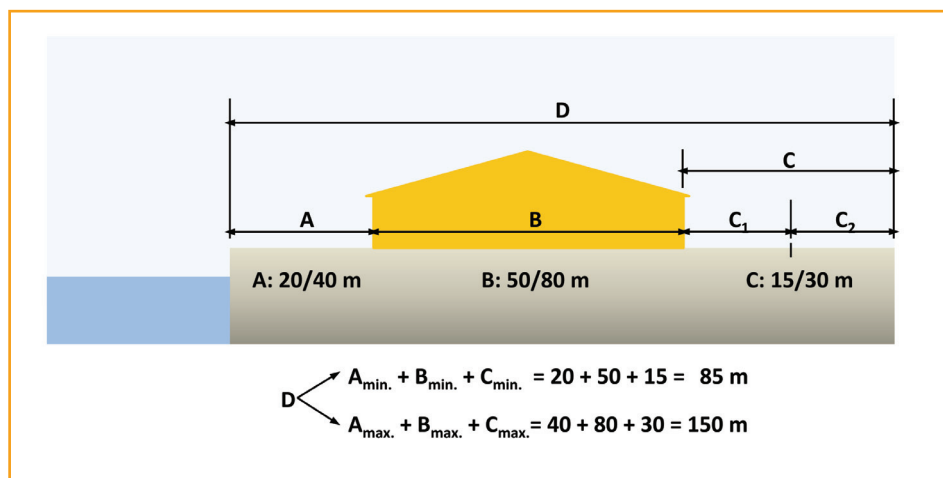
Cincuenta años después del ejercicio de previsión del ingeniero Fuster, en 1961, el también ingeniero Francisco Enríquez presentaba en la Revista de Obras Públicas un artículo bajo el título de *“Productividad portuaria”* y en su arranque afirmaba que *“en realidad mejor hubiera sido encabezar el presente trabajo con otro título extraído de la escala que, comenzando en uno tan jovial como el de “quisicosas portuarias”, pudiera terminar en uno más pomposo y rimbombante, pero no tan comprometedor como el elegido”*. Seguro que estaba en lo cierto el ingeniero Enríquez a pesar de que el contenedor acababa de nacer y lo mejor estaba por venir. Procede añadir que 30 años después, el citado autor también lo fue de una de las pocas monografías que aborda el complejo mundo de las terminales polivalentes (Enríquez, 1991).

NOTA:

Quisicosa: Enigma u objeto de pregunta muy dudosa y difícil de averiguar.

Por último y antes de presentar, tras una breve referencia a los graneles, al verdadero protagonista de la monografía, el contenedor, aportar a través de Rafael del Moral (1991), ingeniero director (1981-2000) y luego Presidente (2000-2004) de la Autoridad Portuaria de Valencia, que *“la década de los sesenta se estrenaba en el ejercicio de la planificación de los muelles de mercancía general con un ratio de 500 toneladas por metro lineal y año”* (ver Figura 3).

Figura 3. Muelle para mercancía general. Años 60-70



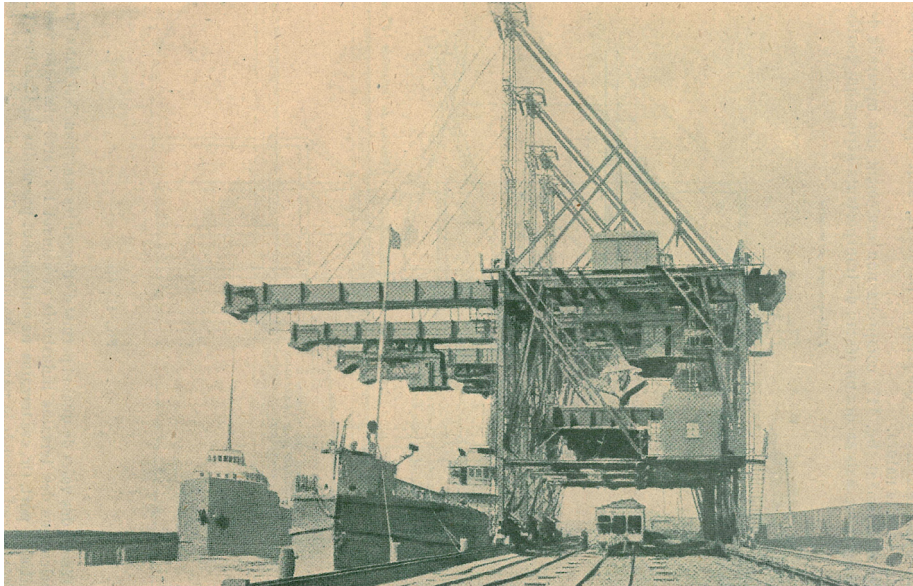
Fuente: Viguera (1977)

Verdaderamente, bastante poco se había mejorado la productividad de la línea de atraque para mercancía general en más de 80 años (1878-1960).

Los graneles

La evolución en la manipulación de los graneles sólidos y semigraneles fue otra historia debido a la mayor facilidad para la movilización de esta categoría de forma de presentación de las mercancías. Los avances tecnológicos, que se traducían en mayores arcos para los buques, junto con las mejoras de las prestaciones de las grúas, impulsaron el desarrollo de terminales especializadas de alta productividad. A modo de ejemplo hay que mencionar la introducción del sistema Hullet para descarga de minerales y carbones a partir de 1905. En la terminal de Cleveland (ver Figura 4), con 4 grúas, se llegaron a descargar 11.800 toneladas en tres horas y media. Otras instalaciones más convencionales, como la del Puerto de Rouen, alcanzaban medias diarias de 2.000 toneladas por torre de descarga. También los semigraneles, por ejemplo los postes para las minas, contaban con instalaciones especializadas, como en el caso del Puerto de Burdeos.

Figura 4. Terminal ("torres" de descarga) de minerales de Cleveland



Fuente: Bénézit (1921)

Algo similar ocurrió con los graneles líquidos incluso con mayores facilidades para su manipulación que los graneles sólidos. Los avances tecnológicos permitieron el crecimiento desde los petroleros T-2 de los años 50 hasta los gigantes petroleros de casi 500.000 TPM de principios de los años 70.

El contenedor

La semilla de la revolución de los puertos en el siglo XX, el contenedor, ideado a mediados de la década de los 50 por Malcom McLean (1913-2001), fundador de la compañía naviera Sea-Land en 1960 (ver Figura 5), germinó en los 60 dando frutos en la década de los 70, que se tradujeron en el pistoletazo de salida de la carrera por el espacio portuario, por la necesidad de disponer de mayores superficies de almacenamiento. En efecto, el progresivo crecimiento de la productividad por línea de atraque, permitía disminuir las estancias de los buques en puerto y con ello propiciaba el incremento de tamaño de los buques portacontenedores y de las grúas capaces de servirlos, en un proceso retroalimentado que persiste en la actualidad.

Figura 5. Buque Tiber de Sea-Land. Primera escala en Valencia atendida por la grúa Liebherr de la terminal de Marítima Valenciana. 1972



Fuente: Autoridad Portuaria de Valencia

Manual de capacidad portuaria: aplicación a terminales de contenedores

Los primeros pasos del contenedor en el Puerto de Valencia se produjeron a finales de la década de los 60 y pronto el crecimiento fue espectacular (Monfort, 1994). De hecho, en la Memoria de 1972 de la Junta del Puerto se expresa la situación en estos primeros años: *“hasta mediados del año, el tráfico de contenedores se venía realizando en unas condiciones que sólo la capacidad de improvisación podía superar. Este año se ha puesto en servicio una estación terminal privada, como consecuencia de un concurso para el contrato de la gestión de los servicios públicos de carga y descarga de contenedores. Pues bien, a los seis meses de esta instalación se ha podido comprobar la superación de todos los órdenes de las previsiones del contrato, en cuanto al mínimo de unidades manipuladas”*. El referido concurso era adjudicado a Marítima Valencia, S.A. La “miniterminal” quedaba ubicada en el muelle Espigón del Turia Norte (ver Figura 6) contando con una superficie de 0,71 hectáreas y una grúa –“la Liebherr”– como medio de carga y descarga en una línea de atraque de 135 metros con 9 metros de calado.

Figura 6. Primera grúa de contenedores en el Puerto de Valencia: “la Liebherr” en la “miniterminal”. 1972



Fuente: Junta del Puerto de Valencia (1972)

La capacidad

Más allá del referido empleo de indicadores empíricos de productividad de la línea de atraque y de almacenamiento, en el ámbito español la referencia monográfica más completa en materia de medición de la capacidad portuaria se remonta al año 1977. Bajo el título de “Capacidad de los muelles”, Fernando Rodríguez desarrolló un extenso trabajo sobre la materia que luego resumiría en su libro “Dirección y explotación de puertos”, editado en 1985 por el entonces Puerto Autónomo de Bilbao. El propio título del primero evoca el empleo de la infraestructura portuaria en un modelo, hoy en desuso, denominado de “muelle libre” o “multioperador” en el que varios operadores trabajan en la misma unidad de explotación o “muelle”. Y es que la progresiva especialización de los tráficos portuarios y su acelerado crecimiento impulsó, a través de la búsqueda de la mejora de la productividad, la evolución de “muelles a terminales”, pasando en la nueva concepción a ser las terminales explotadas por un único operador (modelo “monoperador”), generalmente en el contexto de una concesión u otra categoría de título.

Rodríguez (1977) exponía que *“hasta hace pocos años se definía la capacidad fijando, más o menos empíricamente, el rendimiento admisible por metro lineal de muelle (por ejemplo, 500 t/m para carga general, 1.200 t/m para graneles movidos con grúa, etc.), lo que es excesivamente simplista porque el rendimiento depende de la naturaleza de las mercancías, es decir de la composición del tráfico, de la dotación de grúas, etc. Es cierto que ello podría mitigarse, en parte, mediante una escala más detallada que tuviese en cuenta las indicadas circunstancias, pero, aún así, este método es inadecuado porque no tiene en cuenta el aumento de capacidad unitaria que se produce al aumentar el número de atraques, como la teoría demuestra y la experiencia confirma, y este incremento no puede salvarse aplicando coeficientes correctores, puesto que éstos habrían de ser distintos para cada intensidad de tráfico”*.

En 1978, la UNCTAD exponía que *“se han cometido errores de bulto al predecir la productividad de las terminales de contenedores: el movimiento medio en una muestra de 21 puertos era de 442 contenedores por 24 horas de escala, cifra bastante inferior a las que utilizan en sus cálculos teóricos los consultores y técnicos y los explotadores potenciales”*. Seguidamente realizaba un cálculo teórico alcanzando 860 contenedores en 24 horas añadiendo el comentario de que *“en la práctica, el movimiento medio de mercancías en los puertos de la muestra era ligeramente superior al 50% de la cifra teórica. Evidentemente las cifras que se utilizan en este cálculo son demasiado optimistas para fines de planificación y se deben usar otras*

más realistas cuando se calcule el tiempo de rotación de un buque para el análisis económico.” Pocos años después, Rodríguez (1985) situaba el “índice básico” de línea de atraque en “650 t/m para la mercancía general y en 2.600 t/m para los contenedores”. Sobre estos valores se aplicaban 4 coeficientes correctores:

- Por calado del muelle: entre 0,5 y 1;
- Por cargamento medio (sólo para mercancía general): entre 0,5 y 1;
- Por concesiones y tráficos especializados: entre 1,1 y 1,2; y
- Por número de puestos de atraque: entre 1 y 1,5.

En el caso de la concesión de una terminal de contenedores de 12 o más metros de calado, el índice sería de 2.860 t/m para un atraque, 3.718 t/m para tres atraques y de 4.290 t/m para seis o más atraques.

La hegemonía del TEU

Pronto la unidad de medición de la tonelada cedería su puesto al hegemónico TEU (*Twenty-foot equivalent unit*) ya que el contenedor puede ir lleno, parcialmente cargado o vacío, y los hay de distintos tamaños, de modo que se hizo conveniente emplear una nueva unidad de medición que “traiciona” a muchos autores a la hora de los cálculos en expresiones de rendimiento, capacidad, eficiencia y nivel de servicio.

La UNCTAD (1998) al ilustrar un conjunto indicadores para el contrato de concesión de una terminal de contenedores, tomaba como referencia 300 TEUs por metro lineal en el inicio de la explotación, elevando la meta del indicador a los 500 TEUs/m a los ocho años de vigencia del contrato (ver Tabla 17 del Capítulo 5).

En 1998, Drewry Shipping Consultants situaba el *benchmark* de capacidad en 750 TEUs/m en el caso de terminales por debajo de los 500 metros de línea de atraque, y en 800 TEUs/m para instalaciones mayores. En el año 2002 y de nuevo en el año 2010, la citada consultoría revisaba los *benchmarks* de capacidad acotándolos en el rango entre 800 y 1.700 TEUs por metro de línea de atraque, en función del tamaño de la terminal (longitud de la línea de atraque) y de las características del tráfico servido (regularidad, *import/export* o transbordo, etc.). Ya entonces, el Puerto de Rotterdam, en el ejercicio de planificación a largo plazo (2020), empleaba como ratio de capacidad 1.500 TEUs por metro de línea de atraque para las futuras terminales.

Si se toma una media de 10 toneladas por TEU, los referidos valores alcanzan respectivamente las 8.000 y 17.000 toneladas por metro de línea de atraque; esto es, la revolución del contenedor habría permitido multiplicar por valores de entre 16 y 34 veces, las 500 t/m de los años 60.

Otro dato de interés, en este caso incorporado en los términos de referencia de la licitación del Muelle Prat en el Puerto de Barcelona (2006), para una terminal de 1.500 metros de línea de atraque y 30 años de plazo, contemplaba textualmente “*los rendimientos mínimos que deben conseguirse a lo largo de todo el periodo de explotación:*

- *Al alcanzar la capacidad máxima del atraque, el rendimiento que se obtenga de la línea de atraque debe ser superior a los 1.350 TEU por metro lineal de muelle y año.*
- *Al alcanzar la capacidad máxima de la superficie, se debe conseguir una capacidad de almacenamiento por encima de los 750 TEU por hectárea de área de depósito (excluyendo la zona de maniobra, terminal ferroviaria y otros espacios no directamente destinados al almacenamiento y operativa de recepción/expedición de contenedores). La capacidad resultante no será inferior a 2.000.000 TEU/año”.*

Volviendo al caso del Puerto de Valencia, falta facilitar el dato de que el tráfico contenedorizado alcanzó en el año 2010, los 4,2 millones de TEUs (49.029.766 toneladas) y que la terminal de contenedores dedicada MSC Valencia Terminal, de 770 metros de línea de atraque, llegó a alcanzar una productividad de 1.807 TEUs por metro de muelle (22.384 t/m), lo que equivale, en este caso, a multiplicar por casi 45 veces las 500 t/m de los años 60. Con toda seguridad aquél que hubiera sido capaz de anticipar esta evolución habría sido tachado, cuando menos, de visionario.

NOTA:

Visionario: (Dicho de una persona) que, por su fantasía exaltada, se figura y cree con facilidad cosas quiméricas.

El reto de la gestión portuaria es seguir avanzando en la referida escala de productividades, si bien como se muestra en el presente Manual, tanto la productividad como la capacidad de una terminal no son valores intrínsecos de la misma, de sus dimensiones y equipamiento, sino que dependen de la caracterización del tráfico que va a atender y del nivel de servicio ofertado, de modo que éstos acotan el volumen alcanzable.

En ocasiones la capacidad de almacenamiento ha sido el cuello de botella de las terminales de contenedores limitando su capacidad, actuando como principales factores: el tamaño del patio de almacenamiento, la capacidad estática de éste relacionada con el sistema de manipulación y –evidentemente–, los tiempos de estancia de los contenedores.

La metodología que se propone en el Manual resulta de una combinación de los métodos analítico y de simulación al objeto de ejercicios de planificación portuaria.

Cuando se trata de evaluar la capacidad de una terminal en fase de diseño y en particular de valorar diversos equipamientos de patio es cuando tiene sentido el empleo de modelos de simulación, de menor o mayor complejidad en función de su nivel de abstracción. Lo mismo se puede decir en el caso de que el objetivo sea la mejora de una terminal en explotación. Comentar finalmente que en el marco del Proyecto MASPORT se ha desarrollado paralelamente a los contenidos del presente Manual, por parte del Instituto de Automática e Informática Industrial (ai2) de la Universidad Politécnica de Valencia, con datos de las terminales gestionadas por TCV y MSC para la calibración, un potente modelo de simulación con diversos niveles de abstracción al objeto comentado.

Una cuestión de calado

Antes de pasar a la descripción de los contenidos de los capítulos del Manual resta un último comentario a modo de aviso a navegantes: en el cálculo de la capacidad, el adecuado calado de la instalación es condición necesaria, no siendo objeto de la monografía el análisis del calado a disponer para atender a los buques de la previsión de tráfico, de modo que se da por supuesto que la instalación cuenta con el calado para dar servicio a tales buques.

Contenido del Manual

Tras la presente introducción, en el Capítulo 2 se aborda el concepto de terminal portuaria como sistema conformado por los subsistemas de carga y descarga de buques o de línea de atraque, de almacenamiento, de recepción y entrega y de interconexión. También se aporta una clasificación de tipologías de terminales según la forma de presentación de las mercancías, de su naturaleza y de la forma de manipulación, según el origen y destino de su tráfico, y en función de los agentes atendidos.

En el Capítulo 3 se despliega la tipología de las terminales de contenedores atendiendo al equipo de patio del subsistema de almacenamiento, describiendo a nivel básico sus operativas. En este punto cabe señalar que en la monografía “La Terminal Portuaria de Contenedores como sistema nodal en la cadena logística” (Monfort et al., 2011a) se desarrollan ampliamente los temas de equipamientos y clasificación de terminales de contenedores así como otros que tratan la inserción de las mismas en la cadena logística.

Es el Capítulo 4 el dedicado a ordenar los conceptos de la medición del rendimiento en los puertos: el rendimiento operacional, sus categorías de producción, productividad y utilización; la eficiencia, la capacidad y el nivel de servicio.

En el Capítulo 5 se aporta la metodología para el cálculo de la capacidad de la terminal a partir del cálculo de la capacidad por línea de atraque, mediante una metodología híbrida entre el método analítico y el de simulación, y del cálculo de la capacidad de almacenamiento, que combina el método empírico con el analítico.

Un completo ejercicio de aplicación del Manual conforma el Capítulo 6. En él se trata de clarificar el uso práctico del Manual a la vez que se ilustran las distintas variables que inciden en la variabilidad de la capacidad de una terminal de contenedores.

El documento incorpora cuatro anexos, el primero sobre observaciones y limitaciones a la formulación de la capacidad por línea de atraque; el segundo sobre resguardos en planta en la línea de atraque; el tercero corresponde a los gráficos y tablas de capacidad anual de la línea de atraque en función del sistema y la espera relativa para atraques de 250 y 350 metros y el último explica cómo calcular la productividad anual media de buque atracado (P).

Finalmente se aporta una extensa Bibliografía en la que se presentan tanto las referencias bibliográficas citadas a lo largo del texto como otros documentos de apoyo utilizados en el Manual.

Cuando se clasifica es que ya se tiene una teoría

Jorge Wagensberg, científico y divulgador



La terminal portuaria

2.1. La terminal como sistema

Una terminal portuaria es un intercambiador modal que suele disponer de un área de almacenamiento en tierra para coordinar los diferentes ritmos de llegadas de la mercancía vía marítima y terrestre (Monfort et al., 2001). Su misión es la de proporcionar los medios y la organización necesarios para que el intercambio de dicha mercancía entre los modos terrestre y marítimo tenga lugar en las mejores condiciones de rapidez, eficiencia, seguridad, respeto al medio ambiente y economía.

Asimismo, según Monfort et al. (2001 y 2011a), una terminal portuaria también puede definirse como un sistema integrado, con conexión física y de información con las redes de transporte terrestres y marítimas. Para su análisis se considera que está compuesto por cuatro subsistemas:

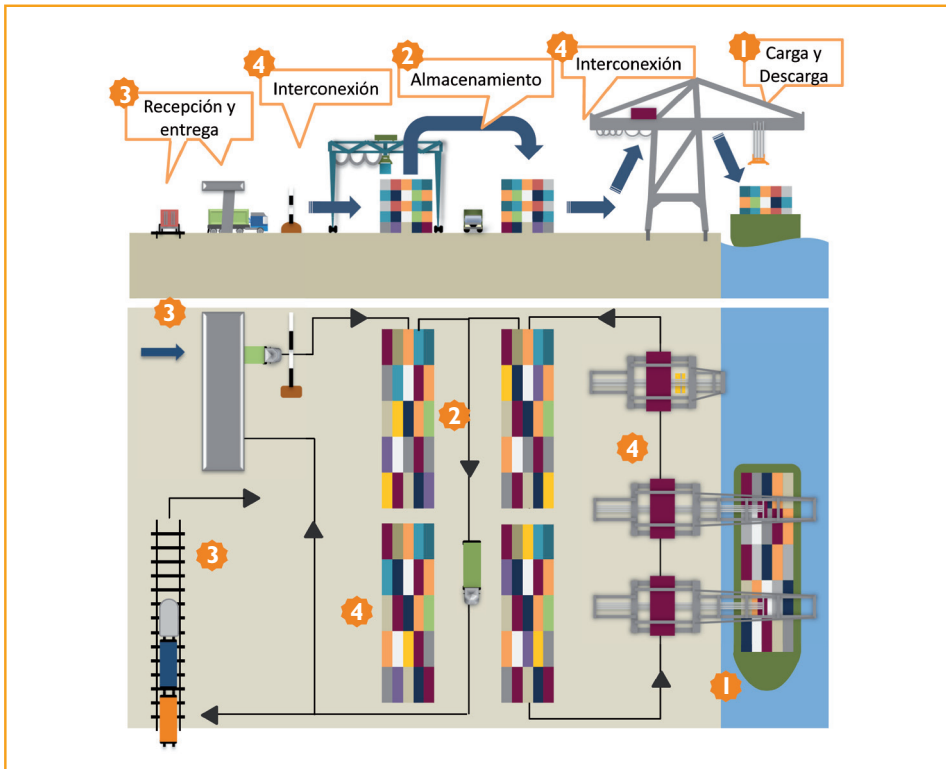
1. El **subsistema de carga y descarga de buques o de línea de atraque** es el encargado de resolver la interfaz marítima, con todos los aspectos de infraestructura y equipamiento que ello conlleva (muelle, medios de carga y descarga, etc.), y las relaciones que, con los agentes implicados, son precisas en esta fase.

2. El **subsistema de almacenamiento** normalmente ocupa la mayor parte de la superficie de la terminal y su función es la de depósito temporal de las mercancías, permitiendo acompañar el ritmo y las prestaciones de los distintos medios de transporte. La disposición de este subsistema y su extensión dependen y son función de la tipología de la mercancía y de la forma de presentación de la misma, del tiempo de estancia, del volumen de tráfico, del equipamiento principal y de la lógica operacional (sentidos de circulación, alturas operativas, zonificaciones) que se empleen.
3. El **subsistema de recepción y entrega** está integrado por las puertas terrestres, almacenamiento temporal y accesos para camión y ferrocarril, por las tuberías o por las cintas, en función de cada caso, equipadas con aquellas instalaciones que se dispongan para facilitar la captación del alto volumen de información que en esa zona se adquiere, y por los espacios y equipos precisos para realizar la operación.
4. El **subsistema de interconexión** es el que asegura el transporte de las mercancías entre los subsistemas anteriores. Más que estar ligado a un espacio físico concreto (como pudieran ser los viales internos de interconexión), este subsistema comprende la solución tecnológica adoptada en cada caso para los movimientos físicos y de información que se precisan. En función de la tipología de la terminal y del equipo del subsistema de almacenamiento, se empleará una determinada maquinaria para cada uno de los movimientos y para el transporte interno de la mercancía.

La morfología de estos subsistemas varía dependiendo de la tipología de la terminal (véase Apartado 2.2). La Figura 7 es un ejemplo de *layout* de una terminal de contenedores, con sus respectivos subsistemas.

En la terminal portuaria se gestionan dos flujos inseparables: el flujo físico de la mercancía y el flujo de información externo e interno. Además existe un tercer flujo, el de responsabilidades, que acompaña a los dos anteriores.

Figura 7. Ejemplo de subsistemas de una terminal de contenedores



Fuente: Monfort et al. (2011a)

Cada subsistema de la terminal cuenta con diferentes elementos relacionados entre sí:

- Infraestructura;
- Superestructura (equipos); y
- Sistema Operativo de la Terminal (SOT o TOS en inglés), que es el conjunto de equipos (*hardware*) y *software* que permiten el intercambio de la información y la generación de órdenes necesarias para la explotación de la terminal. Además, las TIC se

han convertido en el cerebro de las TCs, no solo en la operativa diaria, sino también en la planificación táctica y estratégica. La optimización y automatización junto con el SOT y la aplicación de TI son absolutamente necesarias para el funcionamiento correcto, eficiente y efectivo de una TC.

Algunos equipos e infraestructuras son comunes a varios subsistemas.

En el siguiente apartado se presentan las distintas tipologías de terminales, así como los diferentes tipos de equipos utilizados en sus subsistemas.

2.2. Tipología de terminales portuarias

En la actualidad existen diversos tipos de terminales portuarias consecuencia de la especialización de los tráficos y de las necesidades de manipulación de los diferentes tipos de mercancías. Por lo tanto, las terminales portuarias pueden clasificarse, fundamentalmente, en función de la mercancía, del tráfico atendido y de los equipos de manipulación empleados.

Con relación a la mercancía, las tipologías de terminales portuarias resultan de la combinación de tres clasificaciones relacionadas con la naturaleza, la forma de presentación y la forma de manipulación de las mercancías.

Según su naturaleza, los puertos manipulan cargas de muy diversa índole, como puede ser gas licuado, productos petrolíferos, minerales, productos alimentarios, vehículos, madera, papel, productos electrónicos, cereales destinados (o no) al consumo humano, etc. Con el fin de clasificarlas se han propuesto diversas nomenclaturas. Una de ellas, la del sistema portuario español, cataloga las mercancías por sectores, diferenciando entre los siguientes: sector energético, sector siderúrgico, sector metalúrgico y otros minerales, sector abonos, sector químico, sector de materiales de construcción, sector agroganadero y alimentario, sector otras mercancías, y sector transportes especiales.

No obstante, aunque gran parte de las terminales no se dedican a la manipulación de mercancía de una única naturaleza, sí se especializan en una forma de presentación y manipulación de la misma (véase Apartado 2.2.1). A continuación se describen brevemente las tipologías de terminales portuarias en función de esta clasificación y del tráfico atendido.

2.2.1. Terminales según la forma de presentación y manipulación de las mercancías

En el presente apartado se clasifican las terminales portuarias considerando tanto la forma de presentación como la de manipulación de las mercancías.

La clasificación de mayor consenso desde la perspectiva de presentación contempla dos grandes grupos: los graneles (*bulk cargo*) y la mercancía general (*break bulk cargo* o *general cargo*), que a su vez se subdividen en terminales de graneles sólidos, y de graneles líquidos, y terminales de mercancía general contenedorizada y no contenedorizada, respectivamente.

Otra clasificación de la mercancía general es la que distingue entre mercancía general convencional y mercancía general unitizada. Las formas de presentación de esta clasificación quedan recogidas en la Tabla 1.

Tabla 1. Clasificación de mercancía general y su forma de presentación

Mercancía general	Forma de presentación
Convencional	Sacos, cajas,... Semigraneles (troncos, bobinas,...) Piezas (maquinarias, estructuras, ...) Cargas pesadas
Unitizada	Paletizado Preeslingado Contenedores Plataformas

Fuente: Monfort (2005)

En lo que a la forma de manipulación de la carga respecta, es posible distinguir entre operativa Lo-Lo (*Lift on-Lift off*) y operativa Ro-Ro (*Roll on-Roll off*). La operativa Lo-Lo es aquella en la que la mercancía es cargada y descargada del buque por encima de su borda empleando grúas, bien sean convencionales o especializadas. Por otro lado, la operativa Ro-Ro hace referencia a la carga y descarga de mercancías de forma rodada, y para ello los buques disponen de una rampa que conecta el muelle con sus bodegas.

Además de la manipulación de carga Lo-Lo y Ro-Ro existen otras operativas, especial-

mente diseñadas para la carga y descarga de mercancía a granel, en las que la carga no es izada ni rodada, sino que es transferida mediante instalaciones especiales, tales como tuberías o cintas transportadoras, entre otras.

En la Tabla 2 se observa la correspondencia entre la forma de presentación y la forma de manipulación de las mercancías.

Tabla 2. Forma de manipulación según la forma de presentación de las mercancías

Forma de presentación	Forma de manipulación
Granel líquido	Instalación especial
Granel sólido	Instalación especial Lo-Lo (grúas)
Mercancía general no contenedorizada	Lo-Lo Ro-Ro
Mercancía general contenedorizada	Lo-Lo Ro-Ro

Fuente: Monfort (2005)

Considerando todos estos criterios, las terminales portuarias son clasificadas de la siguiente manera: de granel (líquido y sólido), de mercancía general (mercancía general convencional, carga rodada y de contenedores) y polivalentes.

2.2.1.1. Terminales de granel

Dentro de la tipología de terminales de granel cabe distinguir, atendiendo a la forma en que se presenta la mercancía, entre terminales de granel líquido y terminales de granel sólido.

2.2.1.1.1. Terminales de granel líquido

Las terminales de granel líquido son las instalaciones portuarias dedicadas a la manipulación de líquidos a granel como petróleo, productos petrolíferos, productos químicos, gases licuados, aceites vegetales, etc. (ver Figura 8).

Figura 8. Terminal de granel líquido Horizon Singapore Terminals (Jurong Island - Singapur)



Fuente: Horizon Singapore Terminals Private Limited

La configuración, las dimensiones y las operaciones que se llevan a cabo en estas terminales dependen de su función y de la naturaleza de la mercancía, pudiéndose clasificar básicamente en terminales de transbordo y almacenamiento, y terminales de abastecimiento a una industria o refinería y distribución de sus productos.

Asimismo, también se definen varios tipos de terminales atendiendo a la naturaleza y a la ubicación de su obra de atraque. En este sentido, es posible encontrar terminales en puertos abrigados (véase el ejemplo de la Figura 8) y terminales *offshore* (Figura 9), con o sin áreas y superestructura destinadas al almacenamiento de productos. Pese a sus diferencias estructurales, tienen una particularidad común: haya almacenamiento o no, sus operaciones se realizan de forma continua, sin necesidad de más medios de manipulación que una red de tuberías y un sistema de bombeo (eventualmente con la única necesidad de calentar los sistemas para líquidos viscosos).

Para una mejor comprensión de su operativa, se describe brevemente cada una de estas tipologías.

Las terminales de granel líquido ubicadas en puertos abrigados y con instalaciones para el almacenamiento, consisten en una obra de atraque ya sea un muelle o un pantalán, y un número determinado de tanques (véase Figura 10). Los pantalanes pueden tener forma de I, L o T y están dotados de duques de alba para el atraque y amarre de buques. Las terminales en puertos abrigados son las instalaciones más usuales para la manipulación de la mayoría de los graneles líquidos.

En este tipo de terminales, una vez atracado el buque en el muelle o pantalán, la carga y descarga del granel líquido se realiza mediante tuberías que conectan el muelle con los tanques de almacenamiento.

Por otro lado, las terminales *offshore* están formadas por una única o múltiples boyas de amarre y tuberías enterradas bajo el lecho marino que conectan el buque con las instalaciones en tierra donde se almacena la mercancía.

Figura 9. Terminal *offshore* con boya de SBM



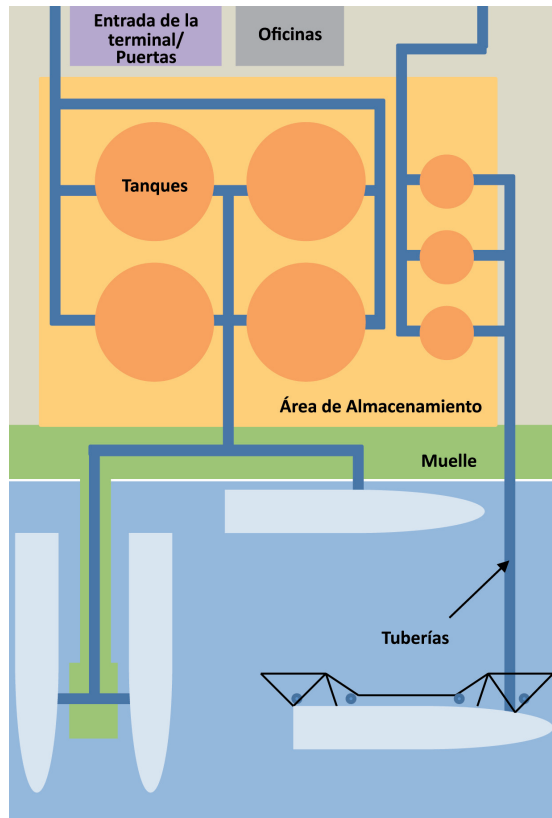
Fuente: SBM Offshore N.V.

Tanto en las terminales en puertos abrigados como en las *offshore*, la recepción y entrega de la carga, dependiendo del volumen y del producto, se realiza por tubería o mediante camiones cisterna.

Cuando estas terminales se encargan del abastecimiento directo a industrias y refinerías o de la carga de sus productos para su distribución, la mercancía se almacena en destino u origen respectivamente. En este caso, la carga y descarga, la interconexión y la recep-

ción y entrega se realizan de forma continuada y con los mismos medios: tuberías que conectan el buque directamente con la industria o refinería.

Figura 10. Ejemplo de *layout* de una terminal de granel líquido



Fuente: Fundación Valenciaport

2.2.1.1.2. Terminales de granel sólido

Las mercancías que manipulan las terminales de granel sólido son fundamentalmente mineral de hierro, cereales, carbón, bauxita y fosfatos. Estas mercancías forman, según la

UNCTAD (1984), un grupo denominado carga a granel principal, mientras que otros productos, como metales y minerales para la construcción (coque, hierro fundido, cemento, mineral de magnesio y chatarra) y otros productos agrícolas, se engloban bajo el nombre de carga a granel secundaria.

Otra clasificación muy extendida es la que diferencia entre granel sucio y granel limpio. El término granel limpio está relacionado con productos destinados al consumo humano o animal (cereales, harinas y piensos), mientras que el granel sucio es aquella carga destinada a otros usos y que suele proceder de la minería y la siderurgia (cemento, clinker, carbón, hierro, etc.). Esta distinción es importante a la hora de determinar la forma de almacenamiento y manipulación de la mercancía. La terminal de la Figura 11 es una terminal de granel sucio mientras que la de la Figura 12 es de granel limpio.

Figura 11. Terminal portuaria de granel sólido El Musel (Puerto de Gijón - España)



Fuente: European Bulk Handling Installation, S.A. (E.B.H.I., S.A.)

Figura 12. Terminal portuaria de granel sólido CHS (Puerto de Duluth - EE.UU.)



Fuente: Duluth Seaway Port Authority

Las operaciones de carga y descarga de las terminales de granel sólido están condicionadas por diversos factores como: la naturaleza del material, el volumen de la operación, el tipo de buque, las condiciones meteorológicas, las limitaciones medioambientales, la distancia entre el muelle y la zona de almacenamiento y el propio tipo de operación, distinguiendo si se trata de carga o de descarga de un buque.

Así pues, además de equipos convencionales, las grúas, para realizar este tipo de operación se utilizan instalaciones especiales de carga y descarga continua que se clasifican en sistemas mecánicos, neumáticos e hidráulicos. Estos sistemas pueden ser fijos, móviles o de sector dependiendo de sus mecanismos de desplazamiento. Cuando se emplean sistemas de carga y descarga especiales fijos hay que desplazar el buque a lo largo del muelle para colocar la escotilla de la bodega pertinente en la posición correcta.

Finalmente, en lo que a la operativa de carga y descarga respecta existen varias alternativas. Es posible distinguir entre las operaciones que se desarrollan empleando equipos emplazados en muelle (práctica más común) y aquellas que se realizan con medios propios del buque. En cualquier caso, el proceso de carga y descarga puede ser continuo o discontinuo, dependiendo del equipo empleado.

Los sistemas más comunes para descargar buques graneleros son: grúas con cuchara, sistemas neumáticos, cintas transportadoras verticales, elevadores de cangilones, tornillos sin fin,

sistemas de suspensión de partículas y sistemas propios de los buques auto-descargables.

La descarga de buques mediante grúas con cuchara es discontinua. La grúa, que habitualmente se encuentra sobre el muelle, aunque puede ser del buque, repite de forma ininterrumpida un ciclo en el que toma el material de las bodegas del buque y lo deja caer directamente sobre la zona de almacenamiento o en una tolva que alimenta a una cinta transportadora o a cualquier otro equipo de interconexión. La estructura de la grúa puede ser de pórtico o giratoria. En cuanto al tipo de cuchara utilizado (ver Figura 13), depende en gran medida del tipo de granel que se quiera manipular: Aunque este sistema también se emplea para la carga de buques, es más habitual utilizar sistemas continuos.

Figura 13. Sistema de tolva y cuchara en El Musel (Puerto de Gijón - España)



Fuente: European Bulk Handling Installation, S.A. (E.B.H.I., S.A.)

Los sistemas neumáticos son sistemas de carga o descarga continua que, atendiendo al procedimiento de impulsión de la carga, se clasifican en: succión o expulsión. Su uso está restringido a mercancía de peso y viscosidad específica bajos como los cereales, el cemento, el carbón en polvo, y los óxidos de aluminio, entre otros. Estos sistemas pueden instalarse en el muelle o a bordo del buque.

Las cintas de transporte verticales, los elevadores de cangilones y los tornillos sin fin son instalaciones especiales mecánicas que extraen el material de las bodegas del buque y lo elevan para de-

positarlo sobre una cinta transportadora horizontal que lo lleva hasta la zona de almacenamiento.

Los sistemas hidráulicos o de suspensión de partículas fueron ideados para el transporte de mineral de hierro y carbón. La mezcla de sus partículas con agua permite su descarga y transporte por tubería como si de un granel líquido se tratase. Este tipo de operación presenta problemas durante la posterior decantación del mineral, así como problemas medioambientales de contaminación del agua.

Finalmente, los buques auto-descargables disponen de sistemas de descarga continua formados por una o varias cintas transportadoras dispuestas longitudinalmente en la parte más baja del buque sobre las que las distintas bodegas descargan su contenido a través de compuertas. Estos sistemas incrementan el precio del transporte por tonelada y hacen que los buques sean más vulnerables a fallos mecánicos, por ello pocos buques cuentan con estos medios.

Por otro lado, la carga de un buque granelero, además de realizarse mediante grúas con cuchara o sistemas neumáticos (de forma análoga a la descarga), también se puede llevar a cabo mediante instalaciones especiales que funcionan por gravedad y, en consecuencia, no sirven para la descarga. Estos sistemas, alimentados por cintas transportadoras, dejan caer la carga en las diferentes bodegas del buque.

En cualquier caso, tanto para la carga como para la descarga, la interconexión muelle-patio suele realizarse mediante cintas transportadoras o tuberías para el caso de sistemas hidráulicos, lo que permite alejar el área de almacenamiento del atraque. Sin embargo, en algunas ocasiones, cuando se emplean grúas con cuchara y la zona de almacenamiento es adyacente al muelle, esta interconexión la llevan a cabo las propias grúas móviles que se desplazan a lo largo del muelle y realizan la carga y descarga directamente a patio (véase Figura 11). Otras veces, se efectúa por medio de vagonetas sobre raíles, sistemas de cables con cubas suspendidas, o camiones volquete todo-terreno.

Otra consideración es la eficiencia energética de los diferentes sistemas, así como la capacidad en toneladas por hora que depende de la densidad del producto. La fiabilidad y el desgaste al uso son otras consideraciones que varían mucho. Y una última puede ser cómo “ayudar” al sistema principal, especialmente en la descarga, con una pala frontal cuando se va vaciando la bodega.

El almacenamiento del granel sólido puede ser al aire libre o a cubierto, en silos o tinglados, dependiendo de las características del producto y de su resistencia a los agentes climatológicos, así como de sus efectos ambientales. Normalmente, los productos como mineral de

hierro, bauxita, carbón y otros minerales se acopian al aire libre, mientras que cemento, yeso, algunos minerales, los cereales y el granel limpio en general, se almacenan en silos o tinglados.

Los silos son depósitos de diversa geometría utilizados para almacenar material granular que debe ser protegido de las inclemencias meteorológicas. A grandes rasgos, se distingue entre silos verticales o torres, y silos horizontales. Su morfología determina las condiciones de almacenamiento y vaciado.

Dependiendo de la proximidad de la terminal a un núcleo urbano, muchas veces se hace necesario realizar tanto operaciones de almacenamiento, como de carga/descarga y de recepción/entrega de la mercancía (principalmente las de granel sucio) a cubierto (ver Figura 14), para que su manipulación no emita partículas hacia el exterior.

Figura 14. Instalación especial "Medusa" de descarga de granel (A Coruña - España)



Fuente: Autoridad Portuaria de A Coruña

Los tinglados son almacenes cubiertos con o sin cerramiento lateral, que al igual que los silos protegen la carga a granel de la lluvia.

El almacenamiento al aire libre se utiliza para mercancías que no se degradan con facilidad al exponerse a los elementos atmosféricos y se refiere a la formación de parvas, bien sea bajo cubierta o a la intemperie. En este caso, el acopio de material granular debe considerar ciertos criterios medioambientales. Para ello, se aplican una serie de medidas encaminadas a evitar la propagación de partículas, tales como la instalación de barreras cortavientos o el regado de las parvas.

Por último, también existen varias alternativas para realizar la operativa de recepción y entrega, aunque siempre que es posible se realiza por gravedad.

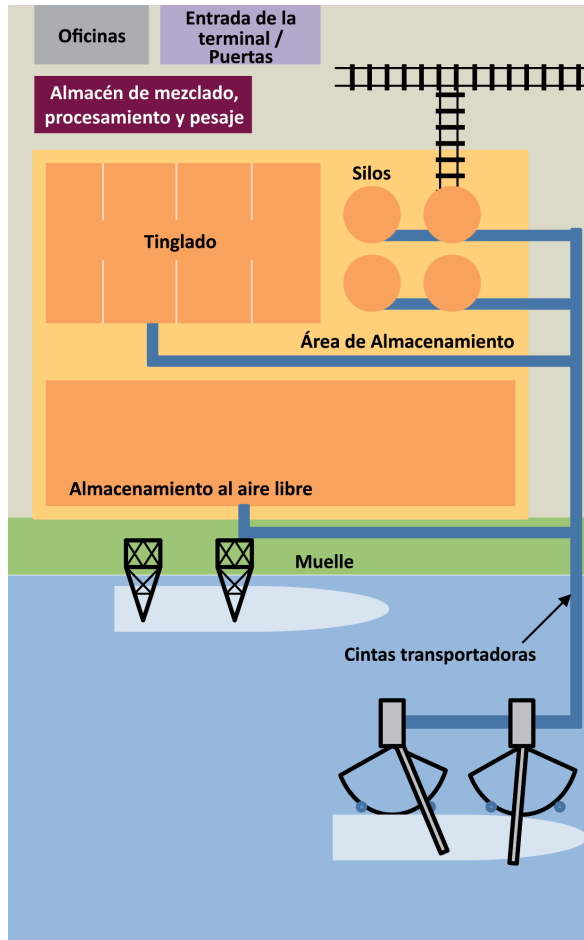
La recepción de camiones es sencilla ya que por lo general se trata de camiones volquete capaces de descargar directamente sobre la explanada o en silos desde una plataforma elevada. Algunas veces, los camiones descargan al pie de las parvas y se hace necesaria la utilización de medios auxiliares, normalmente excavadoras o palas cargadoras, para empujar el material hacia las mismas. También pueden emplearse cintas elevadoras con una tolva en la base.

En el caso de la descarga de ferrocarriles esta operativa es más complicada y puede realizarse básicamente de 4 formas: descarga por el fondo, por basculación circular, por basculación longitudinal y descarga neumática. Los tres primeros métodos necesitan que los vagones se encuentren en una posición elevada respecto del acopio o que existan medios de interconexión (cintas transportadoras) que eleven el material tras su descarga. El cuarto sistema es similar al de descarga neumática de buques. Otra posibilidad consiste en la utilización de una grúa pórtico que tome los vagones uno por uno y los vuelque sobre la parva o el silo en el que la mercancía va a ser acopiada. También es viable aplicar estos métodos a la recepción de mercancía en camión cuando no es posible descargarlos por gravedad.

Para su carga, el camión o el ferrocarril pueden colocarse debajo de las tolvas o los silos verticales, en el caso de que la mercancía esté almacenada en ellos. Cuando la carga está acopiada sobre la explanada es necesario recurrir a medios auxiliares para poder hacer entrega de la mercancía (excavadoras o palas cargadoras).

Además de las actividades propias del servicio de estiba, las terminales portuarias de granel sólido, para satisfacer ciertas necesidades del cliente, realizan también operaciones de mezclado, procesamiento y pesado de la carga previas a la entrega de la mercancía. Estas operaciones también deben contemplarse al planificar el área de la terminal (véase Figura 15).

Figura 15. Ejemplo de *layout* de una terminal de granel sólido



Fuente: Fundación Valenciaport

2.2.1.2. Terminales de mercancía general

Atendiendo a la forma de presentación y manipulación de las mercancías, las terminales de mercancía general pueden clasificarse en terminales de mercancía general convencional, terminales de carga rodada y terminales de contenedores.

2.2.1.2.1. Terminales de mercancía general convencional

Las terminales de mercancía general son instalaciones portuarias muy antiguas que en un principio fueron destinadas al movimiento de mercancía general no unitizada (*break-bulk*). Más tarde, muchas de ellas empezaron a manipular también mercancía unitizada y se han transformado en terminales polivalentes (véase Apartado 2.2.1.3). Aunque las terminales exclusivamente de mercancía general convencional hayan perdido su importancia en los puertos modernos (Ligteringen, 2007), aún son necesarias y se siguen explotando, en particular en el caso de instalaciones de poco tráfico (véase Figura 16).

Los *layouts* de estas terminales son sencillos (ver ejemplo en la Figura 17), y en general no requieren extensiones tan grandes como las de contenedores. La distribución y las dimensiones, así como las instalaciones necesarias dependen de la tipología de mercancía para la cual está diseñada la terminal, y puede disponer tanto de almacenamiento al aire libre como en tinglados, silos o almacenes.

Figura 16. Terminal de mercancía general Marítima Candina (Bilbao - España)

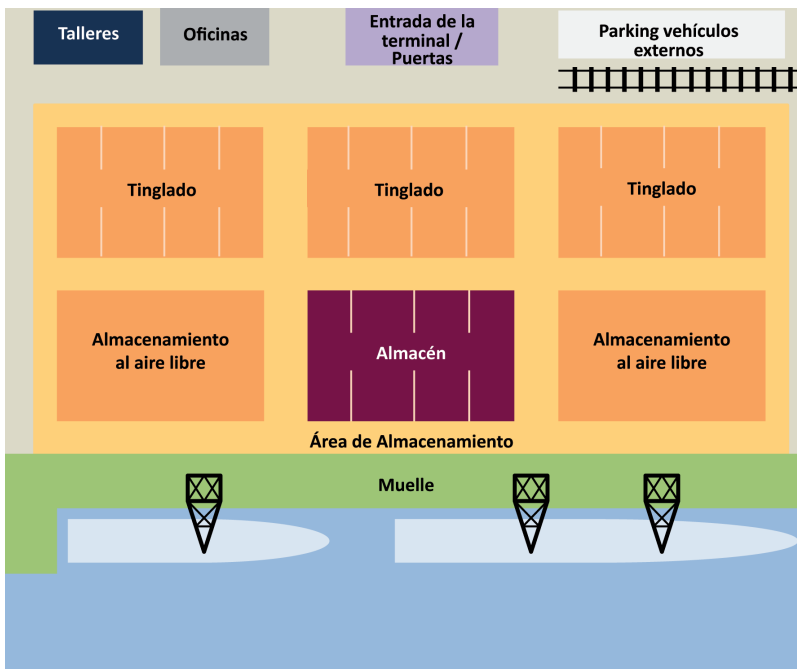


Fuente: Image © Eusko Jauriaritza - Gobierno Vasco. © 2011 Tele Atlas. © Google Earth

Por otro lado, los equipamientos necesarios para el almacenamiento y la interconexión en estas terminales son función de la forma de presentación de la mercancía: carretillas, cabezas tractoras y plataformas, o *reachstackers*. En el caso de la carga y descarga de los buques se utilizan grúas móviles con gran capacidad de elevación (capacidad máxima 140 t, disminuyendo cuanto mayor radio de trabajo).

La mercancía que se mueve en una terminal de mercancía general convencional es de lo más variada: agro-productos (madera en troncos o laminada, papel en bobina, etc.), productos alimentarios (como frutas, azúcar, vino o productos lácteos, etc.), productos derivados del petróleo (aceites, lubricantes, etc.), minerales y productos derivados (bobinas de acero, slabs de acero, hierro, cemento, etc.), fertilizantes (fosfatos), productos químicos, maquinaria, etc. La forma de presentación y manipulación de estas mercancías también puede ser de lo más diversa: bobinas, sacos, paletizados, preeslingados, piezas sueltas, etc. (véase Tabla 2).

Figura 17. Ejemplo de *layout* de una terminal de mercancía general convencional



Fuente: Fundación Valenciaport

2.2.1.2.2. Terminales de carga rodada

Según los diferentes tipos de mercancía transferida, las terminales de carga rodada se clasifican en terminales Ro-Pax, que atienden a pasajeros y a sus vehículos; y terminales

Ro-Ro propiamente dichas, que manipulan, generalmente, carga rodada, que puede ser transportada en remolques (sin cabeza tractora) o ser autopropulsada. En ocasiones, estos tipos de terminales mueven carga no rodada o *fork cargo*. Las terminales de vehículos (Figura 18) se engloban dentro de la categoría de carga rodada autopropulsada.

En las terminales de carga rodada, las operaciones de carga y descarga se llevan a cabo a través de los portalones del buque, pudiendo tener éste de uno a tres, normalmente localizados en proa, en popa, cercanos a éstas, o en un costado.

Las rampas que forman estos portalones al abrirse y que conectan el buque con el muelle deben tener una inclinación tal que permita llevar a cabo las operaciones marítimas de forma segura. Por ello, en puertos en los que la carrera de marea es superior a 1,5 metros la rampa del buque es insuficiente para garantizar que no se supere la pendiente máxima admitida para la operación de entrada y salida de vehículos, y las terminales deben tener un tacón con cierta pendiente o, si necesario, deben instalar puentes flotantes o mecánicos.

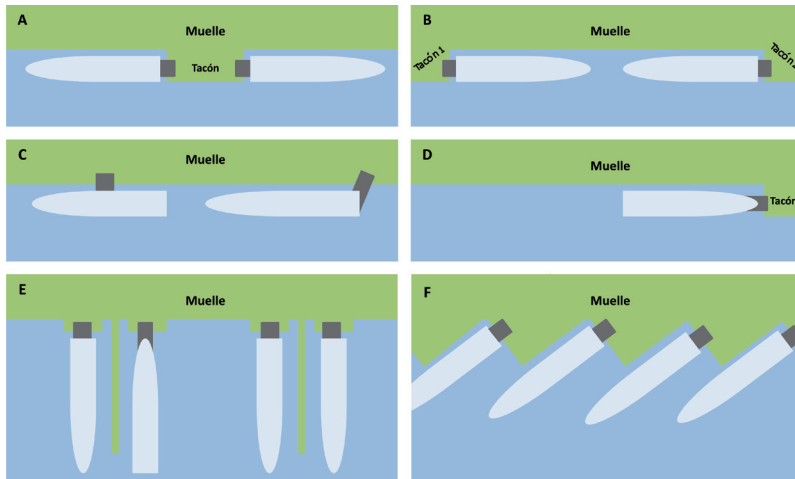
Figura 18. Terminal Ro-Ro de vehículos Carport Sagunto - Bergé (Puerto de Sagunto - España)



Fuente: Carport Sagunto S.L. (Grupo Bergé y Cía. S.L.)

Por otro lado, debido a que la carga y la descarga de vehículos únicamente se realizan a través de estas rampas, la transferencia de mercancía entre el buque y el muelle tiene lugar en puntos muy concretos de la línea de atraque. Para la carga y descarga de buques cuyo portalón se encuentra en proa o popa, el muelle de la terminal muchas veces debe disponer de un tacón o una plataforma flotante que resuelva la interfaz tierra-buque. Cuando el portalón es lateral, cualquier muelle es apto, siempre y cuando tenga longitud suficiente y esté libre de obstáculos (maquinaria o bolardos). La Figura 19 muestra las disposiciones posibles de muelle para las terminales de carga rodada.

Figura 19. Disposiciones de muelle de una terminal Ro-Ro



Fuente: Fundación Valenciaport

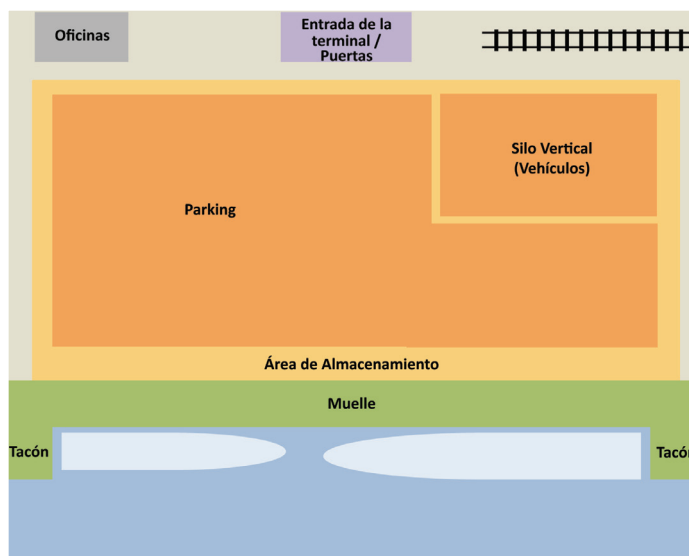
En las terminales de tráfico Ro-Ro, cabe diferenciar entre buques que transportan vehículos autopropulsados y aquellos que transportan remolques. En el caso de los primeros, la carga rodada es cargada y descargada por sus propios medios, mientras que los remolques requieren que la terminal disponga de equipos auxiliares que proporcionen la fuerza motriz necesaria para moverlos: cabezas tractoras.

Los medios requeridos para realizar la conexión muelle-patio son los mismos que los utilizados durante la operativa de carga y descarga. Los vehículos autopropulsados tras salir por la rampa, se dirigen por sus propios medios hacia la zona de almacenamiento.

Cuando se trata de remolques, las cabezas tractoras de la terminal los enganchan y los conducen hasta la posición deseada (a bordo del buque o en patio) donde se liberan de ellos para dirigirse a por el siguiente, cerrando así el ciclo.

La zona de almacenamiento de una terminal Ro-Ro consiste en un gran *parking* de vehículos o remolques, dividido en zonas según tipología, origen y destino de los mismos u otro criterio. Además pueden emplazarse silos verticales para el almacenamiento en altura mejorando la capacidad por superficie (véase Figura 20). En estas terminales también se realizan operaciones de valor añadido al vehículo. La distribución de dichas zonas puede ser muy diversa, pudiendo tener una mayor o menor zona de almacenamiento en función de la carga atendida. Por ejemplo, en algunas terminales en las que operan buques que transportan camiones (conjuntos de cabeza tractora + remolque), las operaciones de carga y descarga no necesitan almacenamiento previo o posterior, solamente es imprescindible una zona de espera para los camiones que serán cargados en el buque; en el caso de la descarga los camiones a medida que desembarcan salen directamente por las puertas terrestres.

Figura 20. Ejemplo de *layout* de una terminal Ro-Ro



Fuente: Fundación Valenciaport

Por último, la recepción y entrega no requiere –salvo en el caso que se comenta en el siguiente párrafo– medios propios (equipos) de la terminal: los camiones están preparados para entrar o salir rodando por la puerta terrestre, los vehículos nuevos son cargados o descargados de otros medios de transporte (camiones o ferrocarril) mediante rampas, y los remolques son transportados por cabezas tractoras externas hasta la terminal o sus destinos finales.

Por otro lado, la operativa Ro-Ro puede aplicarse también a carga no rodada o *fork cargo*. En estas operativas, la mercancía se carga y descarga sobre conjuntos de cabeza tractora y plataforma o carretillas (pertenecientes a la terminal), que la transportan desde el patio hasta el buque o viceversa. Cuando la carga y descarga y la interconexión muelle-patio se llevan a cabo mediante conjuntos de cabezas tractoras y plataformas es necesario disponer además de carretillas, tanto a bordo del buque como en el patio, que transfieran la mercancía entre las cubiertas/bodegas o la explanada, y las plataformas. El almacenamiento, al igual que en las terminales polivalentes (ver Apartado 2.2.1.3), depende de la naturaleza de la mercancía, su forma de presentación y su capacidad para resistir a los agentes meteorológicos, y puede ser al aire libre o en tinglados. Finalmente, la recepción y entrega, en ferrocarril y en camión, se realiza mediante carretillas.

Respecto a las **terminales Ro-Pax**, en ellas coexisten dos tipos de tráfico que requieren instalaciones separadas: el de pasajeros y el de vehículos. El embarque y desembarque de pasajeros se realiza normalmente a través de los *fingers* de una estación marítima, aunque también puede llevarse a cabo a través del propio muelle mediante escaleras.

En paralelo, los vehículos, conducidos por sus propios conductores, entran y salen del buque por la rampa. Esta operación de carga y descarga se produce sin almacenamiento previo ni posterior; respectivamente, en el sentido estricto de la palabra, por consiguiente únicamente es necesaria una zona de espera para los vehículos que serán cargados en el buque. La operativa de almacenamiento se reduce a convocar a los vehículos unas horas antes del embarque para organizar la carga. Una vez en el puerto de destino, éstos salen por la puerta terrestre de la terminal según desembarcan, sin necesidad de que exista un patio de almacenamiento. Sin embargo, es muy importante estudiar los diferentes flujos en terminales de este tipo: embarque de pasajeros, controles (aduana, policía, etc.), destinos diferentes, embarque y desembarque de equipaje, suministro de buques, tripulación, zona de autobuses y taxis, etc. Por tanto, aunque no se usan extensas áreas, los flujos son muy importantes para evitar fallos, enfados de pasajeros, y también por razones de seguridad.

2.2.1.2.3. Terminales de contenedores

En las terminales de contenedores, independientemente del tipo de mercancía, la forma de presentación es –salvo excepciones– única: el contenedor; tal y como se puede ver en la Figura 21.

Aunque existen contenedores de diferentes clases (cerrado, *flat rack*, jaula, media altura, *high cube*, *open top*, cisterna, *reefer*, plataforma, etc.) que pueden requerir ciertas atenciones especiales, generalmente la manipulación de todos ellos es muy similar y es lo que caracteriza la agilidad de la misma.

Las terminales de contenedores pueden utilizar distintos tipos de grúa para las operaciones de carga y descarga de buques, como grúas pórtico o grúas móviles. Las primeras han sido especialmente diseñadas para manipular contenedores, mientras que las segundas son polivalentes. En algunos casos, donde no hay grúas de muelle, deben utilizarse buques con grúas propias. Estas suelen tener una menor productividad que las mencionadas anteriormente.

Figura 21. Noatum Container Terminal Valencia (Valencia - España)



Fuente: Fundación Valenciaport

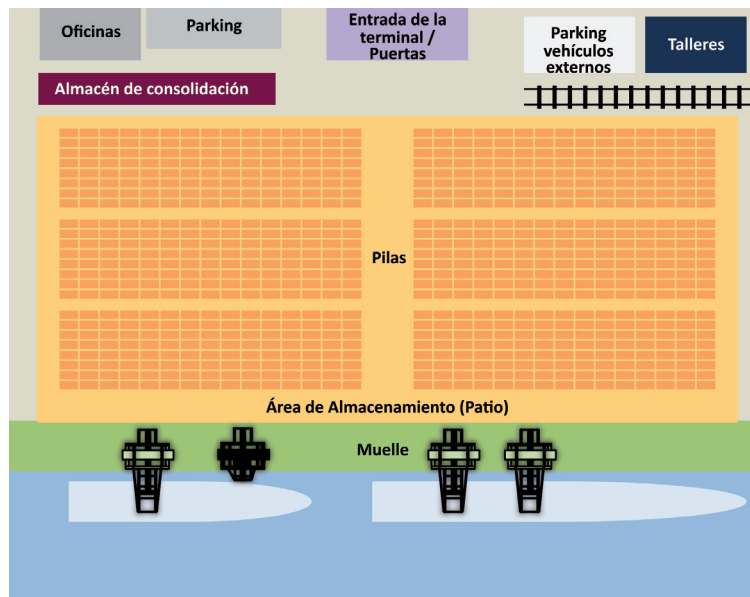
El resto de operaciones de la terminal, así como la configuración de su explanada de almacenamiento o patio (área total, anchura y altura de las pilas de contenedores, separación entre las mismas, los viales y pasillos internos, etc.), están condicionadas por el equipo de

almacenamiento elegido. Los equipos de almacenamiento más utilizados son: plataformas, carretillas, *reachstackers*, *straddle carriers*, RTGs o RMGs (ver más detalles en el Capítulo 3). La Figura 22 muestra un ejemplo de *layout* de una terminal de contenedores (que utiliza RTG como equipo de patio) con sus respectivas infraestructuras e instalaciones.

Por otro lado, en una terminal de contenedores hay que distinguir la operación de acceso a la terminal, función de las puertas (número y horario), de la propia operativa de recepción y entrega que se realiza en las pilas o en las áreas definidas para ello (por ejemplo, zonas del ferrocarril).

Finalmente, para la operativa de interconexión, que es la que se encarga del traslado de los contenedores entre las diferentes zonas de la terminal, se emplea una determinada maquinaria para cada uno de los movimientos a realizar, que depende a su vez de la elección del equipo de patio. Los equipos más utilizados en dicha operativa son: plataformas, carretillas, *straddle carriers* y AGVs.

Figura 22. Ejemplo de *layout* de una terminal de contenedores



Fuente: Fundación Valenciaport

En el Capítulo 3, se describe detalladamente la integración de los subsistemas para una terminal de contenedores, así como la tipología de terminales existente en función del tipo de equipo de patio empleado y los respectivos equipos de interconexión utilizados para cada caso.

2.2.1.3. Terminales polivalentes

Generalmente, las terminales portuarias, debido a la evolución del tráfico, son instalaciones especializadas, es decir atienden a un determinado tipo de tráfico y por lo tanto tienen infraestructuras y equipos especiales para ello. Sin embargo, existen terminales que manipulan tanto mercancía general contenedorizada como no contenedorizada, las llamadas terminales polivalentes o multipropósito, que pueden incluso atender mercancía a granel, aunque no es lo habitual (véase Figura 23). De hecho, se podría decir que una terminal polivalente puede ser una combinación de varios tipos de las terminales ya vistas.

Las terminales portuarias polivalentes manipulan una gran variedad de mercancías que requieren operativas muy diferentes. Entre la mercancía movida en las terminales polivalentes se encuentran: troncos, paquetes de madera, bobinas de papel, mercancías paletizadas, perfiles y planchas de acero, cementos, fosfatos, resinas, lubricantes, maquinaria, etc.

La forma de presentación de estos productos es muy variada: desde contenedores hasta unidades sueltas, pasando por sacos, cajas, piezas, unidades paletizadas, cargas pesadas y mercancía preeslingada, lo que exige a la terminal disponer de maquinaria de manipulación versátil.

Los medios que emplean las terminales polivalentes para resolver la interfaz tierra-mar están subordinados a la forma de presentación de la mercancía. Por norma general, éstas están dotadas de grúas móviles de diferentes potencias y alcances para atender mercancías con pesos y volúmenes diversos. En ocasiones, la carga y descarga se realiza con las grúas del buque. Además, estas terminales suelen disponer de un tacón para el embarque y desembarque de carga rodada.

Figura 23. Terminal polivalente Tisur (Puerto de Matarani - Perú)



Fuente: Terminal Internacional del Sur S.A. (TISUR)

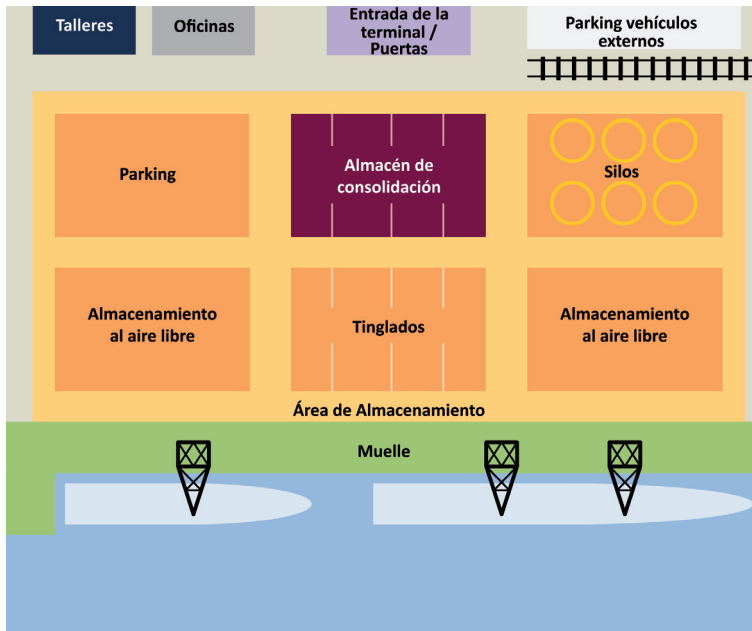
Del mismo modo, los equipos utilizados en el subsistema de interconexión dependen de la mercancía en cuestión, aunque es habitual que estas terminales dispongan de carretillas para cubrir la distancia entre el muelle y el patio. Para distancias superiores a 100 metros habitualmente se emplean una combinación de carretillas y camiones (cabeza tractora con plataforma).

El almacenamiento, atendiendo a la naturaleza de la mercancía, su forma de presentación y su capacidad para resistir a los agentes meteorológicos, puede ser al aire libre, en tinglados, o incluso en silos si se trata de carga a granel, como puede apreciarse en la Figura 23. Además, dentro de su área de almacenamiento, algunas terminales polivalentes disponen de un almacén de consolidación en el que se llevan a cabo actividades de preparación de la carga tanto para su transporte como para su entrega al cliente.

Por último, en la recepción y entrega estas terminales emplean equipos auxiliares (por ejemplo, carretillas) para transferir la mercancía entre el lugar de almacenamiento y los vehículos externos. Para ello, los camiones externos tienen acceso al área de almacenamiento o a la zona destinada a la operativa de recepción y entrega, mientras que en el caso del ferrocarril esta operativa se lleva a cabo en las propias vías.

La Figura 24 muestra un ejemplo de la distribución en planta de una terminal polivalente.

Figura 24. Ejemplo de *layout* de una terminal polivalente



Fuente: Fundación Valenciaport

2.2.2. Terminales según su tráfico

Atendiendo al tráfico al que sirven, las terminales se pueden clasificar de dos formas. Según el origen y destino de las mercancías, la terminal puede ser de origen/destino terrestre o de trasbordo. Dependiendo del número de clientes (navieras) a los que atiende, se distingue entre terminales públicas y terminales dedicadas.

2.2.2.1. Terminales en función del origen o destino del tráfico marítimo

Según el origen y destino predominante de la mercancía que atiende cada terminal, ésta puede ser clasificada como terminal de origen/destino terrestre o terminal de trasbordo.

En las terminales de origen/destino terrestre la mayor parte del tráfico marítimo se dirige o proviene del *hinterland* del puerto, lo que supone un importante flujo de salida y entrada de mercancías por la puerta terrestre de la terminal.

Puede darse el caso de que la terminal sea mayoritariamente (o exclusivamente) de importación o de exportación (por ejemplo, algunas terminales de graneles o determinadas terminales de contenedores de China que son básicamente de exportación).

Las mercancías atendidas en una terminal cuyo tráfico es principalmente de trasbordo tienen su origen y destino en el *foreland* del puerto, entrando y saliendo del puerto por vía marítima, sin que en la terminal se produzca un intercambio modal.

Las terminales de trasbordo normalmente tienen mejores índices de productividad y una capacidad unitaria más alta, tanto de línea de atraque como de almacenamiento, debido a que tienen poca o ninguna actividad de recepción y entrega terrestre, lo que disminuye el tráfico interno en la terminal, mejora la eficiencia y reduce el número necesario de equipos de patio. Además la gestión del patio es más sencilla porque hay menos tipos de zonas de almacenamiento. Todo esto facilita la organización de la operativa.

Otro factor que mejora el índice de productividad de las terminales de trasbordo frente a las de importación y exportación es que se carga y descarga mayor volumen de mercancías por escala, especialmente en el caso de terminales de contenedores, lo que da como resultado tiempos de operación ininterrumpidos más prolongados. Además, en las terminales de contenedores de trasbordo la productividad generalmente es alta debido también a la agrupación de la carga en las bodegas preparada para hacer movimientos masivos y a la posibilidad de utilizar *spreaders* con *twin-lift* (en el caso de que la terminal disponga de dicho equipo).

2.2.2.2. Terminales en función de los clientes que atienden

En función de los clientes que se atienden, las terminales portuarias pueden clasificarse en terminales públicas o terminales dedicadas.

Las terminales públicas atienden buques de cualquier naviera, es decir no están dedicadas a una naviera exclusivamente, mientras que en las terminales dedicadas sólo operan

buques de la compañía que gestiona la terminal. Las terminales dedicadas son una consecuencia de la integración vertical de las navieras.

La gestión de las terminales dedicadas suele ser más sencilla, ya que al tener un sólo cliente, generalmente el flujo de información es más simple, las llegadas de los buques están más controladas y la gestión del patio se simplifica.

Los criterios de gestión y planificación de operaciones de una terminal dedicada frente a los de una pública pueden ser muy diferentes. Las dedicadas se basan más en las necesidades y demandas de su naviera, mientras que las públicas tienen que contentar a muchos clientes, además de mirar por sus propios intereses y por satisfacer las demandas del puerto.

El que espera, desespera

Refrán español



El patio de mi casa es particular

Canción popular infantil



Terminales de contenedores

Desde su aparición a finales de los 50, el tráfico de mercancía en contenedor ha experimentado un crecimiento continuo muy importante por las grandes ventajas que ofrece. En este sentido, las terminales de contenedores tienen ciertas características que les confieren la facultad de alcanzar un grado de sistematización mucho mayor que el de las terminales de otros tipos de mercancía (Monfort et al., 2001), tales como:

- La estandarización del elemento de transporte, el contenedor.
- La estandarización en la forma de manipulación de la mercancía.
- El altísimo nivel de intercambios que se realizan.
- La gran repercusión de la tecnología para la rentabilidad de la terminal.

La estandarización del contenedor como elemento de transporte ha ido acompañada de la especialización y crecimiento del tamaño de los buques, debido al objetivo de las navieras de aprovechar las economías de escala, pero principalmente debido a la necesidad de dar servicio al alto crecimiento de la demanda (crecimiento del tráfico de mercancías mundial). Por ese motivo, los medios de manipulación han experimentado una especialización similar para poder atender cada vez mayores volúmenes de tráfico del modo más rápido y eficiente posible.

Como consecuencia de lo anterior, la operativa en terminales de contenedores, respecto a la manipulación de otra mercancía general, tiene costes de manipulación menores, disminuye los tiempos de carga y descarga, y por tanto la duración de la escala, mejorando la productividad del buque. Asimismo reduce los riesgos

de averías, hurtos y pérdidas de la carga.

En este capítulo se presentan las terminales portuarias de contenedores clasificándolas en función del equipo de patio que emplean. Además se describe la operativa, por una parte profundizando en la integración de los subsistemas, y por otra presentando los equipos de interconexión utilizados para el transporte horizontal entre subsistemas según la maquinaria de patio utilizada.

3.1. Tipología de terminales de contenedores según el equipo de patio

El cálculo de la superficie necesaria para acomodar un tráfico previsto o el de la capacidad de almacenamiento de una terminal en explotación, tal y como se explica en el Apartado 5.4.2.3, dependen de la densidad superficial, de la altura de apilado y del tiempo de estancia de los contenedores en la terminal. Los dos primeros factores son función, sobre todo, del tipo de equipo utilizado para el almacenamiento en patio, aunque en la capacidad también influyen la planificación y la gestión de la operativa.

La selección de la maquinaria define la configuración del patio: anchura y altura de las pilas de contenedores, separación entre ellas, y el dimensionamiento de viales internos, como puede observarse en la Figura 39. Por ello, el elemento caracterizador de la tipología de terminales es el equipo que se emplea para el almacenamiento, de lo que resulta la siguiente clasificación, ordenada de menor a mayor densidad superficial, que se describe en apartados sucesivos con más detalle:

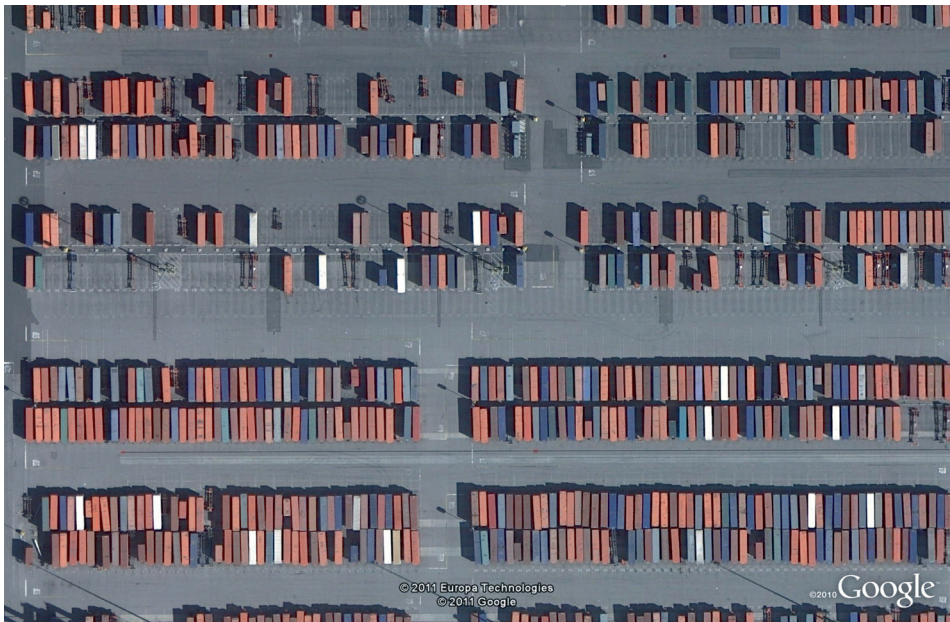
- Plataformas o chasis;
- Carretillas;
- *Reachstackers*;
- *Straddle carriers*;
- RTGs; y
- RMGs.

3.1.1. Plataformas o chasis

En las terminales que utilizan como equipo de patio plataformas, también llamadas chasis, los contenedores se almacenan sobre plataformas dispuestas como si se tratara de un aparcamiento de vehículos (véase Figura 25). Además, estos chasis remolcados por una cabeza tractora conforman el equipo de interconexión entre patio y muelle.

En estas terminales la operación de descarga se desarrolla de modo que las grúas de muelle descargan los contenedores directamente desde el buque sobre las plataformas. Una cabeza tractora remolca la plataforma cargada hasta el patio donde la aparca y después se dirige a un *parking* de plataformas vacías, donde engancha otra y la traslada a pie de grúa de muelle cerrando el ciclo.

Figura 25. California United Terminal (Port of Long Beach - EE.UU.)



Fuente: © 2011 Europa Technologies. © 2011 Google

Las plataformas de patio son remolques especiales y no pueden circular fuera de la terminal. Por otra parte son propiedad de la misma y no de transportistas terrestres. Por esto es necesario transferir los contenedores entre los camiones externos y los chasis de la terminal, para lo cual se suelen emplear carretillas.

Este sistema utiliza mucho espacio porque no se pueden apilar los contenedores en altura, se necesitan viales anchos que permitan la maniobra de aparcar la plataforma cargada

y además hace falta una zona de almacenamiento de plataformas vacías, por lo que la densidad superficial (TEUs/ha) se ve muy reducida (ver Figura 25). Por otro lado, y pese a que el grado de tecnificación requerido es bajo, la inmovilización de las plataformas en patio incrementa considerablemente el coste del almacenamiento.

Tradicionalmente este sistema se ha utilizado en puertos con mucho espacio o donde el coste del suelo era barato. Era el equipo más empleado en las terminales portuarias de Estados Unidos, pero por los motivos anteriores, entre otros, actualmente está perdiendo cuota frente a otros sistemas y de hecho algunas terminales de plataformas están cambiando o han cambiado su equipo de patio por otro sistema.

3.1.2. Carretillas

Las carretillas son equipos de patio capaces de trasladar y elevar los contenedores permitiendo su apilamiento. Por su gran flexibilidad, su capacidad de elevación y movilidad pueden emplearse como equipos de patio, para interconexión, para el apilamiento de contenedores vacíos, en operaciones de recepción y entrega y como equipos de apoyo.

Durante una operación de descarga de un buque, en una terminal que emplea carretillas como equipo de patio, la grúa de muelle deposita los contenedores en éste y las carretillas los recogen, los trasladan al patio y los apilan. La operación de carga se realiza de forma inversa. Además de realizar las operaciones de interconexión y apilado de contenedores, también se encargan de la recepción y entrega, cargando y descargando los contenedores de los camiones o del ferrocarril.

Existen varios tipos de carretillas que pueden ser empleados en una terminal portuaria de contenedores: los *forklifts* y su evolución a carretillas elevadoras con *spreaders* o *semi-spreaders*, los *reachstackers* e incluso los *straddle carriers*, que algunos autores consideran que son un tipo de carretilla pórtico. Tanto *reachstackers* como *straddle carriers* dan como resultado disposiciones de terminal, densidades de apilado, y operativas diferentes a las de las carretillas básicas, por eso se considera necesario tratarlos de modo independiente (ver los siguientes apartados).

Dependiendo de cómo sujeten los contenedores, las carretillas pueden ser de carga frontal (si enganchan el contenedor por las paredes frontales o laterales, con *spreader* o

semi-spreader), elevadoras (si la sujeción es por arriba) o tipo horquilla (si lo hacen por debajo con horquillas) como se puede ver en la Tabla 3.

Algunas carretillas no pueden utilizarse con contenedores llenos por problemas de estabilidad de la máquina o porque el sistema de enganche puede dañar la estructura del contenedor. Las carretillas de vacíos tienen más alcance en altura, menos capacidad de carga y son más ligeras y rápidas.

Con estos equipos se consiguen intensidades de uso del suelo muy bajas porque las pilas de contenedores llenos son estrechas, de poca altura y deben estar bastante separadas: apilado a dos o tres alturas y normalmente dos contenedores de ancho para que todos los contenedores sean accesibles.

Por estos motivos sólo algunas terminales pequeñas, con poco tráfico, utilizan carretillas como único equipo de patio. Las carretillas elevadoras para contenedores llenos están siendo sustituidas por otros equipos con mayor estabilidad, capacidad y alcance como es el caso de los *reachstackers*.

En general todas las terminales cuentan con algunas carretillas para apoyo a la operativa o para contenedores vacíos. En el caso de vacíos, las pilas pueden tener una anchura superior a 2 cajas porque la accesibilidad no es tan relevante. La altura de apilado, en función del equipo, puede llegar a 9, aunque lo normal es trabajar con 5-7 alturas. El apilado a gran altura tiene problemas de estabilidad de las pilas, seguridad de la operación y de visibilidad del operador. El riesgo de deslizamiento de un contenedor, o del vuelco de una pila de contenedores es alto incluso con baja presión del viento, y este riesgo aumenta cuanto mayor es la altura.

3.1.3. Reachstackers (Carretillas de brazo telescópico)

El *reachstacker* (RSs, creado por Belotti en 1976) es una máquina muy versátil que se puede utilizar tanto para el almacenamiento en patio como para los movimientos de interconexión, para la recepción y entrega de camiones y ferrocarril o como equipo auxiliar de apoyo al resto.

Este equipo es resultado de la especialización de las carretillas elevadoras, con una pluma telescópica inclinada de la que se sujeta el *spreader* (ver Figura 26). Respecto a las carretillas tradicionales los *reachstackers* tienen más capacidad de carga, mejor accesibilidad a los conte-

nedores apilados, mayor estabilidad y son más versátiles. Así, pueden alcanzar los contenedores situados en la segunda fila de la pila siempre y cuando se encuentren como mínimo a una altura por encima de los de la primera, y en el caso de contenedores vacíos hasta la tercera fila si se encuentran a una altura o más por encima de los de la segunda fila.

El fabricante Liebherr ha diseñado y fabricado un *reachstacker* con el brazo telescópico curvo, que mejora aún más la accesibilidad a los contenedores de segunda y tercera fila reduciendo el número de remociones (ver Figura 26).

Figura 26. Ejemplos de *reachstackers*



Fuente: Fundación Valenciaport



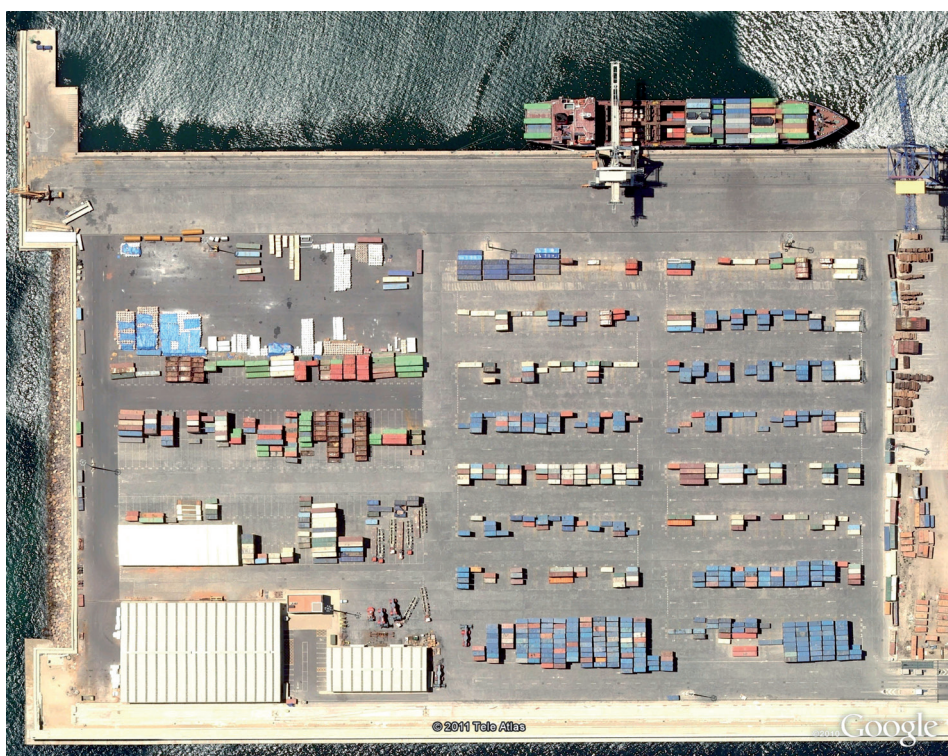
Fuente: Liebherr-Werk Nenzing GmbH

En las terminales que utilizan *reachstackers* como equipo de patio, las pilas de contenedores llenos tienen habitualmente 3 o 4 contenedores de ancho (véase Figura 27). Sin embargo, la densidad superficial (TEUs/ha) de estas terminales sigue siendo bastante reducida, pese a que se duplica la anchura de bloque respecto a la de las terminales de carretillas.

La operación de descarga de un buque en una terminal de *reachstackers* se realiza de modo similar a la de carretillas.

En terminales pequeñas los *reachstackers* se utilizan como maquinaria de almacenamiento, para el traslado de contenedores entre muelle y patio y para el resto de movimientos de interconexión. Además se emplean en la recepción y entrega terrestres tanto de camiones como del ferrocarril en terminales de cualquier tamaño. Asimismo en terminales grandes se utilizan como equipo auxiliar.

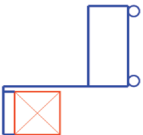
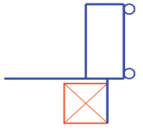
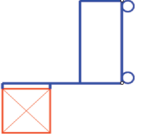
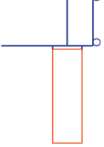
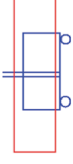







Figura 27. Terminal P. Castellón (Puerto de Castellón - España)



Fuente: © 2011 Tele Atlas. Google Earth

La Tabla 3 resume los diversos tipos de carretillas para contenedores existentes en el mercado. Todas estas opciones configuran disposiciones de patio diferentes.

Tabla 3. Resumen de tipología de carretillas

ELEVADORA CON SPREADER		FORKLIFT		FRONTAL DE ENGANCHE LATERAL Y SEMISPREADER		FRONTAL CON ENGANCHE FRONTAL		SIDELOADER		REACHSTACKER	
Fuente: Svetruck AB		Fuente: Konecranes Ausio SLU		Fuente: Fundación Valenciaport		Fuente: Fundación Valenciaport		Fuente: Fantuzzi Noell Iberia SLU		Fuente: Fundación Valenciaport	

Fuente: Monfort et al. (2011a)

3.1.4. Straddle Carriers (SC)

Los *straddle carriers* (SCs, creados por Belotti en 1969) son carretillas pórtico que cargan el contenedor entre sus patas, a horcajadas, en paralelo a su dirección de desplazamiento, y pueden elevarlo varias alturas (ver Figura 28).

Se trata de máquinas muy versátiles que pueden realizar todos los movimientos necesarios para el traslado de los contenedores por la terminal, el almacenamiento, y la recepción y entrega de camiones externos. Incluso pueden emplearse para la carga y descarga de ferrocarriles, aunque no son las máquinas más adecuadas para esto.

Figura 28. *Straddle carrier* y su correspondiente patio



Fuente: Konecranes Ausio SLU



Fuente: Fantuzzi Noell Iberia SLU

Como en el caso del *reachstacker*, en una operación de descarga de un buque, la grúa portacontenedores deposita el contenedor en el muelle y un *straddle carrier* lo recoge y lo lleva a la pila. Las operaciones de recepción y entrega terrestres se realizan en una zona de la terminal entre las puertas y el patio donde se posicionan los camiones externos. Los SCs trasladan los contenedores entre el patio y dicha zona.

En general, aunque las pilas formadas por SCs pueden alcanzar alturas de hasta 3 contenedores (3+1), la altura de pila media con la que trabajan las terminales que usan estos equipos est  entre 1,5 y 2 contenedores (ver Figura 28). El ancho de pila es de un conte-

nedor. Entre las pilas se deja un pasillo de 1,5 a 2,0 metros (mínimo 1,2 m) para las patas de los *straddle carriers*. En general, las pilas se disponen perpendiculares al muelle, con lo que se obtienen productividades mayores y un mejor aprovechamiento del espacio, aunque con mayor riesgo de colisión entre vehículos. Por ello, algunas terminales han optado por colocar las filas de contenedores paralelas al muelle generando un flujo circular que evita el cruce de las trayectorias de los SCs. Sin embargo, de esta forma, los recorridos realizados por los equipos son más largos.

Este sistema aprovecha mejor el espacio, obteniéndose una densidad de apilado mayor que con plataformas, carretillas o *reachstackers*. Además, los contenedores están muy accesibles y son necesarias pocas remociones. Es un sistema idóneo para terminales de tamaño medio, que manipulan entre 100.000 y 400.000 contenedores al año, que no requieren un uso intensivo de la superficie disponible.

Las principales ventajas de los *straddle carriers* frente al resto de sistemas de patio son su flexibilidad operativa y velocidad, así como su menor demanda laboral, mientras que sus mayores inconvenientes son la limitación de altura de apilado y el mayor coste de mantenimiento que requieren.

El *shuttle carrier* (ShC) es un equipo similar al *straddle carrier* pero de menor tamaño, y de altura 1+1. Con él se pueden elevar los contenedores lo suficiente como para pasar uno por encima de otro, pero no sirve como equipo de almacenamiento. En cambio es un sistema ágil y rápido para la interconexión muelle-patio. La utilización de estos equipos para realizar dicha transferencia tiene la gran ventaja de que tanto las grúas de muelle como las de patio pueden trabajar sin esperar al equipo de transporte interno, logrando así desacoplar el funcionamiento de los subsistemas (*decoupling* – más información en el Apartado 3.2).

3.1.5. Rubber Tyred Gantry cranes (RTG)

Los equipos *Rubber Tyred Gantry Crane* (RTG), o grúas pórtico sobre neumáticos, son grúas autopropulsadas que se desplazan siguiendo trayectorias rectilíneas sobre las pilas de contenedores que ellas mismas van formando entre sus patas.

En su presentación habitual, los RTGs apilan los contenedores entre 3 y 5 alturas y trabajan sobre bloques de 6 o 7 filas de contenedores de ancho más un carril adicional por

donde circulan tanto camiones externos como internos (véase Figura 29). Para la entrega o recogida de un contenedor, los camiones circulan por ese carril, se colocan al costado de la pila y esperan a que el pórtico realice la operación.

Una operación de descarga de buque se desarrolla de modo que la grúa de muelle descarga el contenedor sobre una plataforma (o sobre otro vehículo de interconexión), que se desplaza a la pila de almacenamiento. Allí, el RTG descarga y posiciona el contenedor en la pila. La plataforma es liberada para que pueda ir a recibir otro contenedor en el muelle. La operación de carga de buque sigue el proceso inverso.

Las terminales que utilizan RTGs como equipo de almacenamiento suelen emplear como equipos de interconexión, por ejemplo entre el muelle y el patio, cabezas tractoras más plataformas, aunque también *reachstackers* y otros tipos de carretillas (ver Apartado 3.2).

Figura 29. Patio de RTGs, Noatum Container Terminal Valencia (Valencia - España)



Fuente: Fundación Valenciaport

En el patio de una terminal de RTGs, las pilas formadas por estos equipos se suelen disponer paralelas al muelle y separadas por una distancia suficiente para permitir el movimiento de los equipos de interconexión. Cada cierta distancia los bloques de contenedores se interrumpen para dar paso a viales de circulación que permiten el tráfico perpendicular a las pilas.

Con este sistema se obtiene una densidad de apilado alta, que aumenta conforme crece el tamaño de la pila, tal y como puede observarse en la Tabla 30. Aunque el tamaño habitual es el mencionado anteriormente, en algunos puertos de Asia las dimensiones de las pilas pueden ser mucho mayores, con alturas de 1 sobre 7 y anchos de hasta 13+1 contenedores, dando como resultado densidades de patio mucho más altas, similares a las de los RMGs, como puede verse en el Apartado 5.4.2.3.

Actualmente, las grandes terminales de contenedores que no se plantean la automatización, suelen elegir entre SCs o RTGs como equipamiento de patio, ya que ambos equipos tienen prestaciones similares, cada uno con ventajas e inconvenientes sobre el otro (ver Tabla 4).

3.1.6. Rail Mounted Gantry cranes (RMG)

El *Rail Mounted Gantry Crane* (RMG) es una grúa pórtico de forma similar al RTG pero que se desplaza sobre raíles. Generalmente tiene dimensiones superiores a las de los pórticos sobre neumáticos. Además de en terminales portuarias, este sistema se utiliza en muchas terminales interiores (puertos secos), y en terminales ferroviarias.

Las operaciones de carga y descarga de buques se desarrollan de igual modo que para los RTGs, salvo en el caso de que se trate de pórticos automáticos, como se explica más adelante.

Como los RTGs, los RMGs también suelen atender en la pila a los camiones externos para la operativa de recepción y entrega. En este caso los vehículos circulan por viales que, normalmente, se disponen en el costado exterior de las patas de los RMG, por lo que las vigas de estos equipos sobresalen en voladizo (*cantilever*) para poder situar el *spreader* sobre los camiones.

Las pilas de los patios de RMGs tienen una anchura de entre 8 y 12 contenedores o incluso mayor, y una altura entre 4 y 5 contenedores. Debido a dicho tamaño de bloque una de las principales ventajas de los RMG es el alto aprovechamiento de la superficie de patio.

Los RMGs se utilizan en terminales con mucho tráfico y poco espacio. También en aquellas terminales con un tráfico ferroviario importante. Por otra parte, al circular sobre raíles, el movimiento de los pórticos tiene menos grados de libertad que el de los RTGs, y es más sencillo de automatizar. Por eso son los equipos de patio habituales de las terminales automatizadas.

Entre las desventajas de los RMGs se encuentran su elevado peso, lo que conlleva la necesidad de una infraestructura con la cimentación reforzada, la falta de flexibilidad por ser un sistema sobre raíles y la dificultad de hacer remociones si la ocupación es muy alta. Además si hay dos pórticos o más en una misma pila, normalmente no pueden cruzarse, lo que dificulta las operaciones cuando hay, simultáneamente, operaciones de recepción y entrega con camiones externos, y carga y descarga de buques, o cuando uno de ellos se avería. Esto se ha resuelto implantando pórticos pasantes de modo que un pórtico es de menor tamaño que el otro y pueden cruzarse (*Double Rail Mounted Gantry Crane, DRMG*). Sin embargo esta solución aumenta el costo de la instalación del sistema y disminuye la densidad de apilado.

3.1.7. Terminales automatizadas

En terminales donde se han implantado soluciones de automatización del almacenamiento se utilizan pórticos automáticos sobre raíles llamados *Automated Stacking Cranes (ASCs)*, o RMGs automatizados. Estos equipos funcionan sin manipulador en la propia máquina y tienen dimensiones similares a un RTG, entre 6 y 10 contenedores de anchura y 4 o 5 más uno, de altura (ver Figura 30).

Cuando se trabaja con ASCs se puede realizar la interconexión de muelle y patio de modo automatizado con AGVs (*Automated Guided Vehicles*), aunque también es posible optar por equipos con manipulador, como cabezas tractoras más plataformas o *shuttle carriers*.

En cambio, las operaciones de recepción y entrega de camiones terrestres se hacen de modo semiautomático y fuera del patio: el camión se coloca en la cabecera de la pila, en una zona separada del ASC por una valla. El pórtico realiza la operación de modo automático salvo los últimos metros que, por seguridad, son supervisados mediante control remoto por un operador desde una torre utilizando las cámaras que se disponen a tal efecto.

Figura 30. RMGs automáticos (ASCs), APM Terminals Virginia (Port of Virginia - EE.UU.)



Fuente: Konecranes Ausio SLU

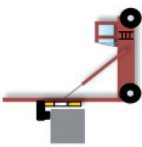
Otro sistema de grúas pórtico automáticas es el llamado OHBC (*Overhead Bridge Cranes*). Se trata de pórticos de hormigón sobre los que se colocan los raíles para que circulen puentes grúa. Conceptualmente es similar a los puentes grúa utilizados en naves industriales aunque el desarrollo de la operativa es similar al de los RMGs automáticos.

La ventaja principal del OHBC es que permite trabajar con pilas de dimensiones mucho mayores que el resto de equipos, dando lugar a densidades de apilado muy elevadas. Además, la configuración rígida de la estructura simplifica mucho su automatización. Como inconvenientes pueden citarse entre otros, mayores inversiones en obra civil y la necesidad de hacer muchas remociones.

Este sistema se implantó a mediados de los años 90 en una de las terminales del puerto de Singapur, pero ninguna otra terminal se ha decantado por su uso.

La Tabla 4 presenta un resumen cualitativo de las características de los equipos de patio de las terminales de contenedores descritas en el presente apartado.

Tabla 4.- Caracterización de la operativa de la terminal según tipología de equipamiento de patio empleada

	Plataformas	Carretillas	Reachstackers	Straddle Carriers	RTGs	RMGs
Altura de apilado	1	3 (llenos) 6-9 (vacíos)	3 (llenos) 6-7 (vacíos)	2-3	3-5	4-5
Anchura de pila	np	4 (llenos) Vacíos en bloque	4	1	6	8-12
Densidad superficial	Muy baja	Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy alta
Requisitos de pavimentación	Muy bajos	Muy bajos	Muy bajos	Medios	Altos	Muy altos (raíles)
Coste de adquisición	Alto	Bajo	Medio	Alto	Alto	Muy alto
Coste de mantenimiento	Bajo	Medio	Medio	Alto	Alto	Alto
Años vida útil (media)	5	6-7	8-10	7-8	10	20
Posibilidad de automatización	Muy baja	Muy baja	Muy baja	Baja	Alta	Muy alta
Costes de personal	Bajo	Medio	Medio	Medio	Alto	Muy baja
Capacidad de personal	Baja	Baja	Medio	Alta	Alta	Bajo
Integridad de contenedores	Alta	Baja	Baja	Baja	Media	Alta
Flexibilidad de operaciones	Alta	Alta	Alta	Alta	Media	Baja
Facilidad de ampliación	Alta	Alta	Alta	Alta	Media	Baja
Facilidad cambio de layout	Alta	Alta	Alta	Alta	Baja	Muy baja
Eficiencia energética	Baja	Baja	Baja	Baja	Media	Alta
						

Fuente: Adaptado de Monfort et al. (2011a)

3.2. Descripción operativa

Las terminales de contenedores operan en unas condiciones que, en muchas ocasiones, superan los parámetros para los que fueron diseñadas, por ejemplo en lo referido al tráfico anual, la duración de la estancia de los contenedores en el patio, la ocupación instantánea –capacidad estática– o la densidad de apilado. Así podría hablarse de unas condiciones de diseño o las normales de operación, y otras condiciones para los casos de alta ocupación.

En ocasiones los clientes imponen unas condiciones de servicio en cuanto a la productividad de la escala, el número medio de grúas por buque, los días que quieren dejar los contenedores en la terminal, o incluso pueden querer realizar operaciones masivas de carga o descarga de contenedores vacíos, que pueden prolongarse o no en el tiempo y que alteran las condiciones habituales. Como ejemplos, puede ser necesario apoyar la operativa de muelle con grúas móviles, o aumentar la capacidad de almacenamiento, bien incrementando la altura media de apilado o bien recurriendo a utilizar viales o zonas fuera del patio para el almacenamiento. Ocasionalmente, dar preferencia a la operativa marítima puede producir que los equipos de patio retrasen las operaciones de recepción y entrega, y lleguen a formarse colas de espera de camiones externos.

Respecto a la gestión de la operativa de patio, puede considerarse que existen dos intereses contrapuestos: la facilidad de la operativa por una parte y el coste de la misma por otra. Así, trabajar con densidades de ocupación bajas, con alturas reducidas de apilado y amplios viales implica buena accesibilidad a los contenedores y que, por tanto, se hagan pocas remociones, la circulación interna sea sencilla, y el patio pueda dividirse en muchas zonas, lo que facilita sobre todo la operativa de carga y la atención simultánea a varios buques. Por otra parte, el coste de la superficie impulsa a trabajar con densidades de apilado elevadas. De este modo se reducen las distancias que deben recorrer tanto los equipos de patio como los de interconexión, y por tanto sus consumos. La terminal planifica su gestión buscando el equilibrio entre ambos intereses.

Asimismo existen otras cuestiones que afectan a la operativa y por ende a la capacidad de la terminal. De esta manera, y pese a la estandarización del contenedor, hay cierto porcentaje de contenedores especiales que imponen unas condiciones de manipulación que afectan negativamente a la productividad de los equipos, y unas condiciones de almacenamiento que, en general, reducen la capacidad del patio de la terminal. Por ejemplo, los contenedores refrigerados (*reefers*) deben conectarse a la red eléctrica para mantener la temperatura mientras están en el patio. La terminal dispone de una zona con tomas

eléctricas para este tipo de contenedores. Adicionalmente, la disposición de esas tomas limita la altura máxima de apilado de los *reefers*. Otro caso son los contenedores sobredimensionados, los de mercancías peligrosas, y los *open top*, entre otros, que deben ocupar unas posiciones determinadas en las pilas.

Integración de los subsistemas

En una terminal de contenedores todos los equipos realizan ciclos de forma continua. Además esos ciclos interactúan unos con otros (Figura 31). En el dimensionamiento de la terminal hay que calcular el equipamiento necesario de cada tipo para que el funcionamiento sea óptimo buscando el equilibrio de intereses entre la productividad y los costes. En general se considera que el recurso limitante, el que marca el ritmo de los demás, es la grúa de muelle por ser el elemento más caro. La asignación del resto de equipos debe hacerse de modo que la grúa de muelle no tenga que esperar a que los equipos de transporte interno evacúen o le suministren contenedores, pero sin sobredimensionar el número de estos vehículos ni el número de equipos de patio, para mantener los costes en un nivel aceptable. El problema surge cuando la mano de obra es demasiado cara, como en el caso de España, EE.UU. y muchos países de la UE. En este caso, mantener permanentemente ocupada la grúa de muelle puede ser demasiado caro, por lo que la productividad está limitada.

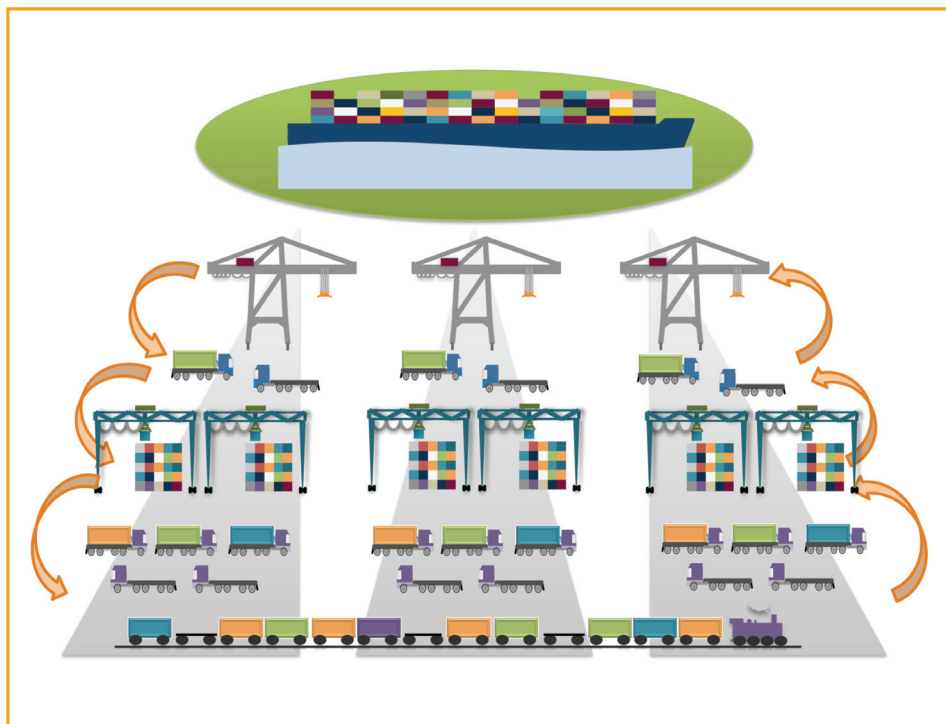
La función de la grúa de muelle es cargar y descargar contenedores del buque y de los camiones internos (o del equipo de interconexión muelle-patio que tenga la terminal). El ciclo de trabajo será continuo si hay suficientes equipos de interconexión para trasladar los contenedores descargados del barco al patio y llevar al muelle los que haya que cargar.

Por su parte, el ciclo de los equipos de interconexión (camiones, SCs, AGVs u otro) en el caso de la descarga del buque consiste en esperar en el muelle a que la grúa descargue un contenedor, trasladarlo al patio y ahí esperar a que la grúa de patio recoja el contenedor para colocarlo en la pila, y finalmente volver al muelle. Para la carga de contenedores, el equipo de interconexión espera en la pila a ser cargado, se dirige al muelle donde espera a que la grúa recoja el contenedor, y vuelve al patio para empezar de nuevo el ciclo. En el caso de SC, no hay periodos de espera y el mismo equipo realiza las transferencias y el apilado o desapilado. Los ciclos de estos equipos de interconexión están directamente enlazados por un lado con los de la grúa de muelle y por otro con los de la grúa de patio.

En algunos casos las operaciones se realizan de modo continuo y la relación entre subsistemas es todavía más evidente. Sirva de ejemplo una terminal que utiliza como equipo de patio algún tipo de carretilla o SCs, en una operación de descarga, el mismo equipo que realiza la interconexión muelle-patio, apila el contenedor.

Finalmente, en las terminales que utilizan grúas pórtico como equipos de patio, la actividad de estos consiste en la carga o descarga de los contenedores de los equipos de interconexión y de los camiones externos, almacenar y realizar las labores de reorganización del patio encaminadas fundamentalmente a facilitar las próximas operativas de carga y descarga (*housekeeping*).

Figura 31. Relación entre equipos (grúas de muelle, camiones internos y externos y RTGs)



Fuente: Fundación Valenciaport

Con este funcionamiento, los ciclos de las grúas de muelle y patio están indirectamente relacionados porque si no hay equipos suficientes en patio, no se podrá atender con la velocidad requerida a los equipos de interconexión y por tanto la grúa de muelle tendrá que esperar. Por lo que para planificar una escala donde la preferencia es la productividad de buque (grúas de muelle), se tiene que dimensionar el resto de equipos de patio y mano de obra en función de las grúas de muelle, pero manteniendo los costes en un rango aceptable.

Las terminales han intentado romper la dependencia directa tanto de las grúas de muelle como de las de patio, del funcionamiento de los equipos de interconexión. A esto se le conoce como *decoupling* (desacoplar). Con un sistema de *decoupling*, las grúas de muelle y las de patio recogen y depositan los contenedores en el suelo, en una plataforma fija elevada, o en un *cassete*, sin tener que esperar a que llegue el equipo de interconexión.

El *decoupling* puede ser total o parcial, se puede plantear con equipos manuales o automáticos, y puede necesitar el apoyo de equipos intermedios (ver Tabla 5).

Tabla 5. *Decoupling* en el sistema de interconexión

	Automático	Manual
<i>Decoupling</i>	AGV-Lift	SC; Shuttle carrier
<i>Decoupling</i> con equipos auxiliares	AGV-Cassette	T+P con cassette

Fuente: Monfort et al. (2011a)

Equipos de interconexión

En la terminal portuaria el contenedor está sujeto a varios movimientos: carga o descarga del buque, transporte entre muelle y patio, traslados dentro del patio, y los de recepción y entrega. El subsistema de interconexión es el que se encarga de la distribución interior de los contenedores teniendo en cuenta los requisitos de los demás subsistemas respecto a rapidez, fiabilidad y seguridad.

La tipología de equipamiento de patio determina el tipo de equipos a emplear en cada

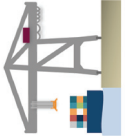


uno de los movimientos de interconexión a realizar:

- Traslado de contenedores entre el muelle y el patio;
- Traslado de contenedores entre el patio y la zona de recepción y entrega de camiones;
- Traslado de contenedores entre el patio y el ferrocarril; y
- Otros movimientos, como posicionamiento para inspección.

La Tabla 6 muestra un resumen de los equipos de interconexión utilizados en función de los equipos de patio para cada uno de dichos movimientos.

En general, los cambios de posición de los contenedores en el patio suelen realizarlos los propios equipos de patio, aunque en ocasiones es necesario el apoyo de otros medios, carretillas o incluso camiones internos, como ocurre en los trabajos de *housekeeping*, que pueden suponer el cambio de pila de los contenedores.

Tabla 6. Equipos de interconexión entre los distintos subsistemas en función del equipo de patio

EQUIPO DE PATIO	 Muelle ← → Patio	 Patio ↔ R/E Camiones	 Patio ↔ R/E Ferrocarril	OTROS MOVIMIENTOS
CARRETILLAS	T+P o Carretillas	Carretillas	Carretillas	Carretillas y/o T+P
SCs	SC	SC	Carretillas	SC o Carretillas
RTG	T+P	RTG	RTG y T+P con carretillas o RTG/RMG en R/E ffcc	Carretillas o T+P
RMG	T+P o <i>Shuttle carrier</i>	RMG	RMG y T+P con carretillas o RTG/RMG en R/E ffcc	Carretillas y/o T+P
ASC	AGV o <i>Shuttle carrier</i> o T+P	ASC	ASC y ShC o T+P con carretillas o RTG/RMG en R/E ffcc	Carretillas

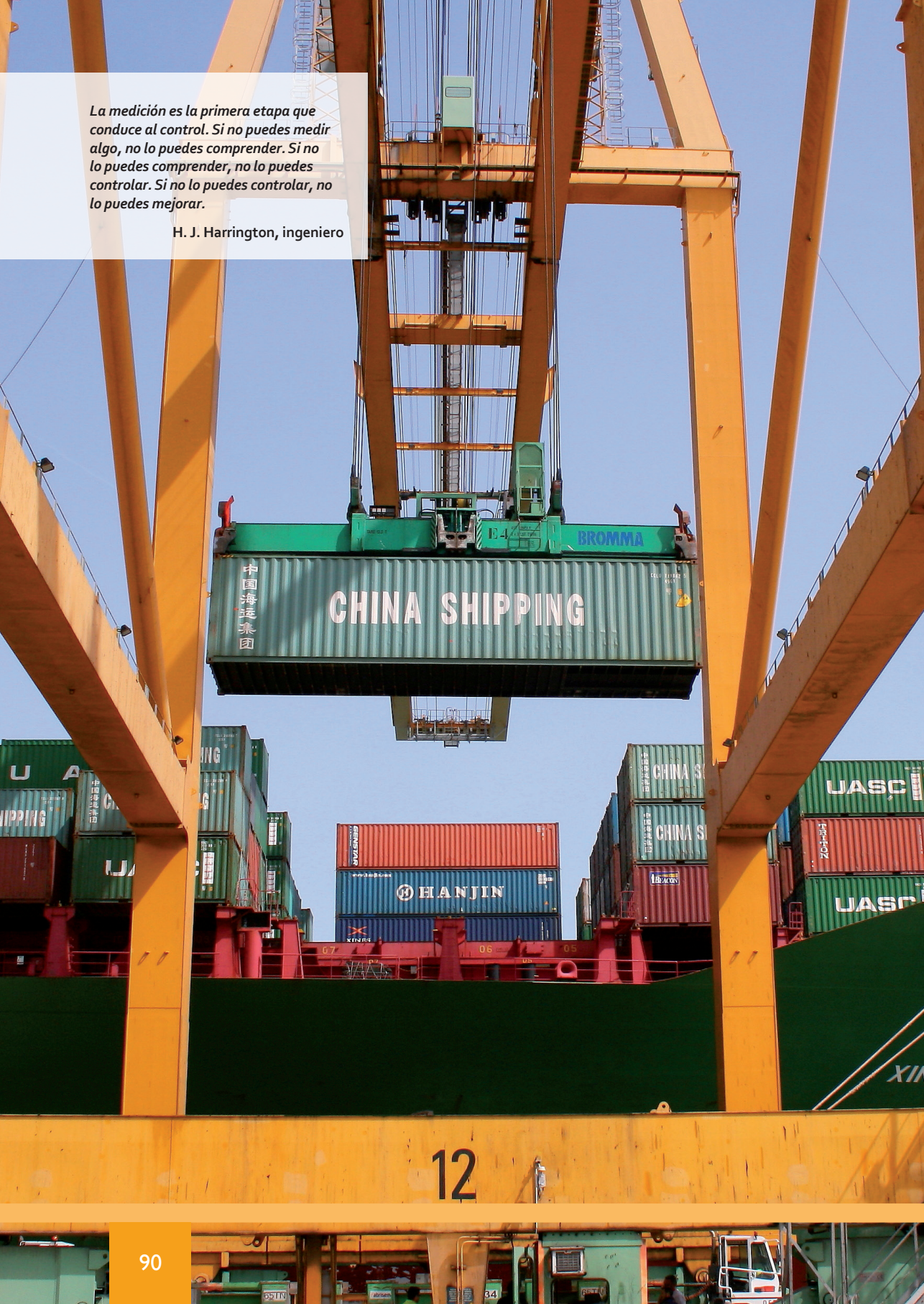
T+P: sistema de tractor más plataforma

R/E: Recepción y entrega

Fuente: Monfort et al. (2011a)

La medición es la primera etapa que conduce al control. Si no puedes medir algo, no lo puedes comprender. Si no lo puedes comprender, no lo puedes controlar. Si no lo puedes controlar, no lo puedes mejorar.

H. J. Harrington, ingeniero



12

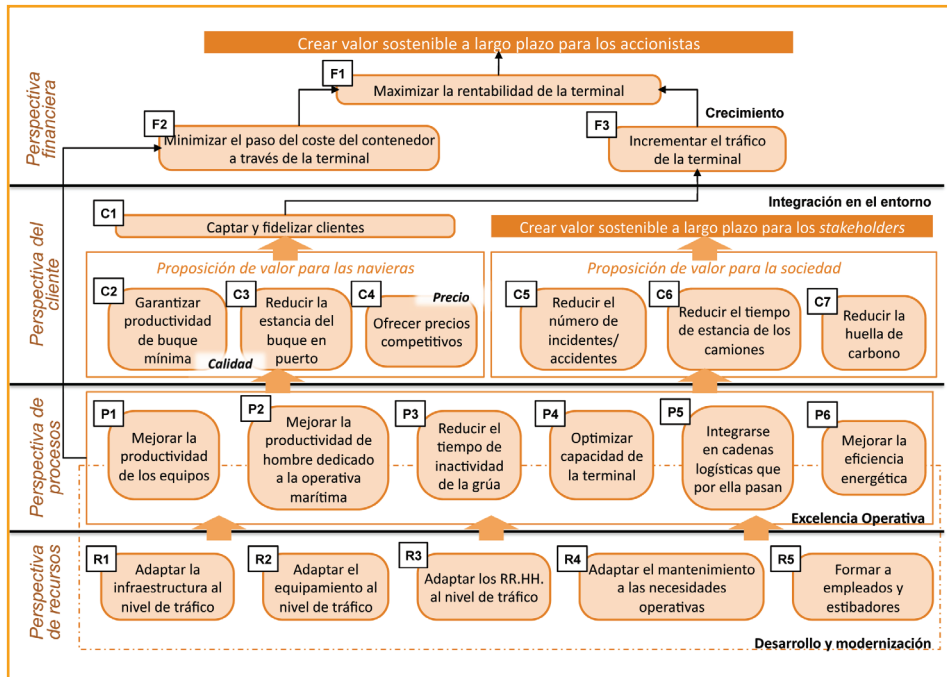
La medición del rendimiento operacional, la eficiencia, la capacidad y el nivel de servicio

4.1. La medición del rendimiento en los puertos

Los indicadores clave de rendimiento (KPIs) son mediciones cuantificables, acordadas de antemano, que reflejan los factores de éxito críticos de una organización, y por lo tanto dependen de cada organización (About.com Management). En el caso de puertos o terminales portuarias, la gerencia debe planificar e implementar un sistema de medición integrado e integral capaz de expresar el funcionamiento de la instalación en su conjunto y el de sus recursos. Para ello lo habitual es diseñar un **sistema de indicadores** que facilite tal seguimiento y permita la comparación con otras instalaciones e informar a los diversos *stakeholders* relacionados con el puerto.

Tanto en los casos de un puerto o sistema portuario como en el de una terminal portuaria, lo óptimo es la definición y desarrollo del referido sistema en el despliegue de un **mapa estratégico** (Figura 32), instrumento del **Cuadro de Mando Integral** (CMI) que traduce la estrategia de la empresa en objetivos (Kaplan y Norton, 1997) cuya consecución se mide a través de tales indicadores, en un proceso retroalimentado de puesta en marcha de distintas iniciativas o proyectos (Estrada, 2007; Martín-Soberón, 2010; Monfort et al., 2011b).

Figura 32. Propuesta de Mapa Estratégico para una terminal

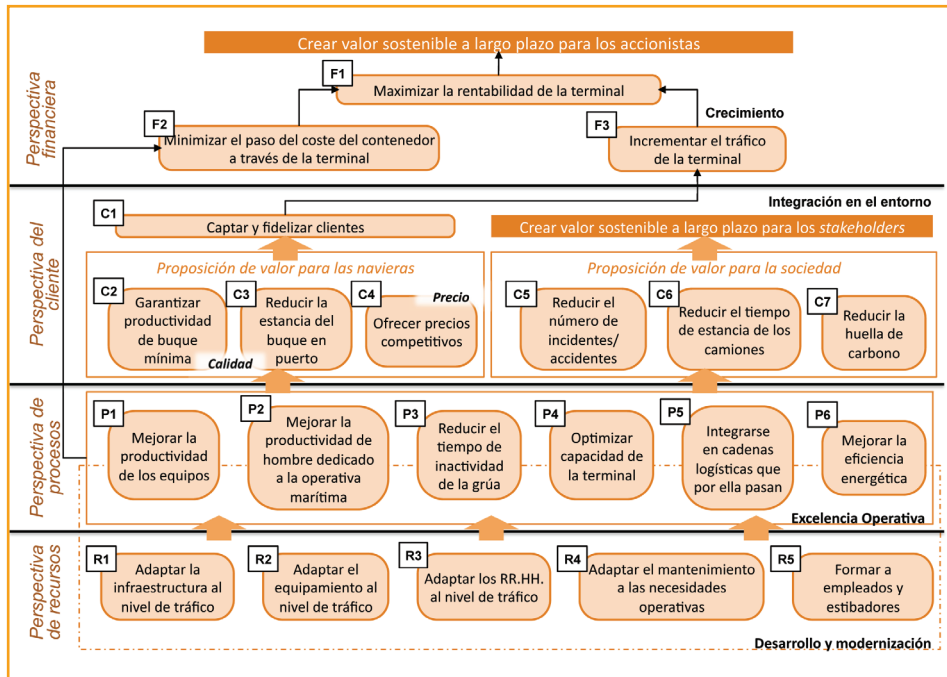


Fuente: Monfort *et al.* (2011b)

Los referidos indicadores son parte del ámbito genérico que desarrolla la medición del denominado **rendimiento portuario** –en el sentido de funcionamiento o desempeño– o **port performance**. Éstos han sido objeto, desde hace décadas, de diversas clasificaciones y análisis (UNCTAD, 1976 y 1983; De Monie, 1988, etc.) y han evolucionado en los últimos años a visiones más amplias del concepto de puerto en la cadena logística (Bichou, 2004; De Langen *et al.*, 2007; ESPO, 2011).

Así, la UNCTAD (1976) segmentó los indicadores de rendimiento portuario en dos grupos, financieros y operacionales (ver Tabla 7), con el objetivo de medir el empleo de los recursos del puerto. Los indicadores financieros se evalúan en términos monetarios –salvo el caso del indicador de “tonelaje manipulado”–; y, los operacionales en unidades de producción (toneladas, cuadrillas, etc.) y tiempo (hora, jornada o turno de trabajo, etc), en varios casos en relación con el buque.

Figura 32. Propuesta de Mapa Estratégico para una terminal



Fuente: Monfort et al. (2011b)

Los referidos indicadores son parte del ámbito genérico que desarrolla la medición del denominado **rendimiento portuario** –en el sentido de funcionamiento o desempeño– o **port performance**. Éstos han sido objeto, desde hace décadas, de diversas clasificaciones y análisis (UNCTAD, 1976 y 1983; De Monie, 1988, etc.) y han evolucionado en los últimos años a visiones más amplias del concepto de puerto en la cadena logística (Bichou, 2004; De Langen et al., 2007; ESPO, 2011).

Así, la UNCTAD (1976) segmentó los indicadores de rendimiento portuario en dos grupos, financieros y operacionales (ver Tabla 7), con el objetivo de medir el empleo de los recursos del puerto. Los indicadores financieros se evalúan en términos monetarios –salvo el caso del indicador de “tonelaje manipulado”–; y, los operacionales en unidades de producción (toneladas, cuadrillas, etc.) y tiempo (hora, jornada o turno de trabajo, etc), en varios casos en relación con el buque.

parte de los operadores la misma tipología de indicadores de ambas categorías, con una significativa presencia de los indicadores operacionales sobre los financieros (87,55% frente a 12,45%).

La ESPO (2011), en el marco del Proyecto “Port Performance Indicators, Selection and Measurement” (PPRISM), con un planteamiento holístico que da respuesta al conjunto de los distintos colectivos de *stakeholders* relacionados con la cadena logístico-portuaria, ha dividido los indicadores en cinco categorías (tendencias del mercado y estructura, socioeconómicos, ambientales, cadena logística y rendimiento operacional; y gobernanza), seleccionando 14 indicadores (Tabla 8) a partir de una muestra inicial de 159. Está previsto disponer de los datos de estos indicadores a través de la información facilitada por las correspondientes autoridades portuarias.

Tabla 8. Categorías e indicadores de rendimiento portuario

Categoría	Indicador tipo	Unidades
Tendencia del mercado y estructura	Tráfico marítimo	t
	Tamaño de la escala	t/GT
Impacto socioeconómico	Empleo	Ud
	Valor añadido	Ud monetaria
Medioambientales	Huella de carbono	t CO _{2e}
	Residuos generados	m ³ /t
	Consumo de agua	m ³ /t
	Programa de gestión ambiental	Sí / No
Cadena logística y rendimiento operacional	Conectividad intermodal	Índice fórmula
	Conectividad marítima	Índice fórmula
	Calidad procesos aduaneros	Índice fórmula
Gobernanza	Integración del clúster portuario	Índice fórmula
	Alcances de la RSC	Índice fórmula
	Autonomía de gestión	Índice fórmula

Fuente: ESPO (2011)

El contraste entre la Tabla 7 y la Tabla 8, más allá de los 35 años que las separan, reafirma la antes referida evolución hacia una visión integral del puerto en la cadena logística orientada a los distintos grupos de *stakeholders*. Ello sin menos cabo de la necesidad del manejo de indicadores operacionales y financieros a la hora de los análisis más micros, como en el caso de las terminales a nivel individualizado.

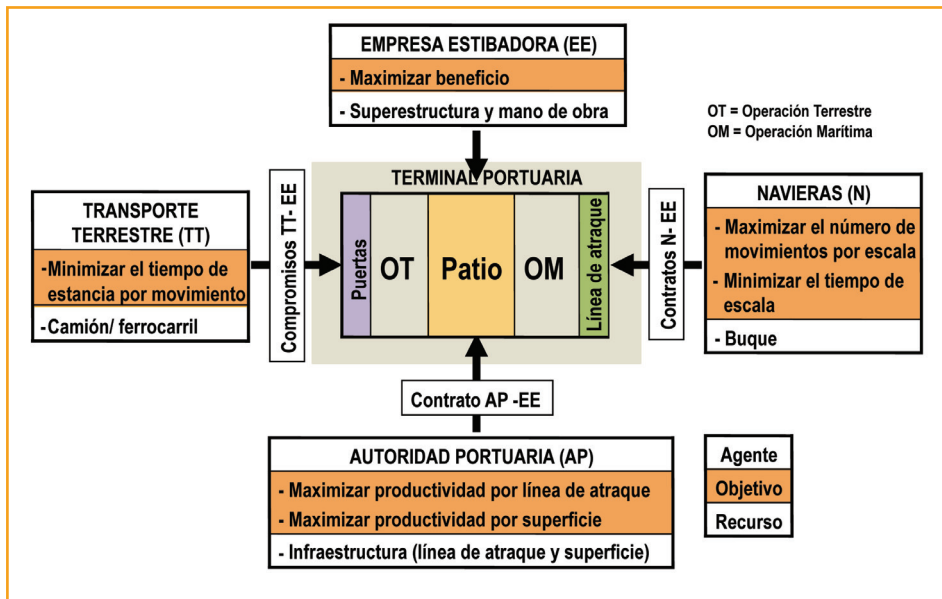
En el espacio del conocimiento del **rendimiento operacional portuario**, incluyendo la dimensión financiera, se emplean términos como tráfico, *throughput*, productividad, ocupación, eficiencia, capacidad, etc. con escasa precisión, de modo que se generaliza el uso de clasificaciones o taxonomías particulares. Esto genera, en muchas ocasiones, un área de conocimiento abierto y consecuentemente poco preciso (Monfort et al., 2000; Bichou, 2007). La referida problemática no resulta fácil de superar en un sector globalizado como el portuario, haciendo en ocasiones muy complejo el ejercicio de comparación de indicadores supuestamente equivalentes.

En el escenario descrito, el presente capítulo estructura cuatro perspectivas de medición complementarias con el objeto de aportar una ordenación conceptual que facilite la mejor interpretación del presente manual sobre capacidad portuaria:

1. el **rendimiento operacional**, vinculado con la medición de la producción, productividad y utilización de los recursos de la terminal, tanto en términos técnicos como económicos;
2. la **eficiencia**, que trata la relación entre los recursos empleados y el volumen de mercancías que moviliza la terminal, en términos de optimización;
3. la **capacidad**, relacionada con la cantidad límite de mercancías que en un periodo de tiempo admite la terminal; y,
4. el **nivel de servicio**, relacionado con la calidad del servicio ofrecida a los clientes y usuarios de la terminal.

Entre los *stakeholders* directamente relacionados con la planificación y explotación de una terminal de contenedores cabe destacar a: la Autoridad Portuaria, el operador de la terminal (empresa estibadora), las empresas navieras y las de transporte terrestre. En la Figura 33 se muestra esquemáticamente el conflicto de intereses que se produce entre estos en el marco de los correspondientes contratos y compromisos.

Figura 33. Esquema del conflicto de intereses en la terminal portuaria



Fuente: Monfort (2008)

Conviene destacar la importancia de los indicadores de rendimiento operacional que se contemplan habitualmente en los contratos de concesión entre la Autoridad Portuaria y el operador de la terminal. Una buena selección y definición de los indicadores facilitará el seguimiento y la mejora de la oferta de la instalación (UNCTAD, 1998; World Bank, 2007; Kent y Ashar, 2010).

A continuación se profundiza en cada una de las cuatro perspectivas de medición, aunque previamente es importante señalar que mientras que los indicadores relacionados con el rendimiento operacional son fruto de la aplicación directa de mediciones reales, las otras tres perspectivas requieren patrones que modelicen situaciones concretas ideales del puerto o la terminal, incluso en algunos casos se hace necesario la realización de un *benchmarking*.

En lo que sigue, el texto se refiere al concepto de terminal portuaria como elemento básico en el cálculo de la capacidad del puerto.

4.2. Rendimiento operacional

Una terminal portuaria puede ser considerada como un centro de producción (De Monie, 1998) y como tal debe ser objeto del correspondiente control del volumen de producción, de su ritmo, del grado de utilización de los recursos empleados y de sus costes.

En este contexto, se definen las siguientes categorías de medición del rendimiento operacional portuario:

1. **Producción:** expresa el volumen de manipulación de la terminal en un periodo de tiempo, sin explicitar los recursos empleados. Cuando la producción se expresa en unidades monetarias se generan los indicadores financieros.
2. **Productividad:** está relacionada con el ritmo de trabajo de los diferentes recursos existentes en la terminal. Esto es, la productividad se puede definir como el volumen (producción) por unidad de tiempo y de recurso manipulado en la terminal.
3. **Utilización:** define la intensidad con la que se usan los recursos, es decir, el ratio, expresado en porcentaje, entre el uso de un determinado recurso y el máximo posible en un periodo de tiempo.

En la Tabla 9 se recogen algunos indicadores tipo y sus unidades para cada una de las categorías.

Tabla 9. Categorías de medición, indicadores tipo y unidades

Categoría de medición	Indicador tipo	Unidades
Producción	Tráfico anual	t/año
	<i>Throughput</i>	TEUs/año
Productividad	Productividad de línea de atraque	t/m y año
	Productividad buque en puerto	t/h en puerto
	Productividad de grúa	t/h Movimientos/h
Utilización	Utilización de línea de atraque	% de ocupación

Fuente: Fundación Valenciaport a partir de Monfort et al. (2000)

Así, una estimación discreta de la capacidad de la terminal por línea de atraque (Capítulo 5), en el periodo de tiempo considerado es una **medición de producción que resulta del producto:**

- del **número de atraques**
- por una **medición de utilización y por el tiempo operativo** del recurso atraque
- por otra **medición de productividad** del buque atracado
- siendo su resultado función del **nivel de servicio** requerido (Monfort, 2008).

En el ámbito de la medición del rendimiento operacional de las terminales de contenedores cabe citar el denominado *Container Terminal Quality Indicator* (CTQI), un nuevo sistema de gestión de calidad para TCs que, a través de la correspondiente auditoría global de la instalación –vía certificación de calidad–, persigue la evaluación de la calidad de los resultados de la instalación, allanando el camino para la mejora (Germanische Lloyd Certification, 2008). Fue presentado a comienzos del año 2008 tras un proceso liderado por Germanischer Lloyd (GL), junto con el Global Logistics Institute (GLI). Para la conformación del modelo se contó con la colaboración de una cualificada representación de operadores y expertos relacionados con el tráfico contenedorizado (Sapiña, 2007). La estructura del modelo contempla cuatro bloques: sistema de gestión, factores internos, factores externos y evolución del rendimiento, e incluye hasta 80 indicadores o mediciones de rendimiento, siete de ellos bajo la categoría de indicadores clave (KPI, *Key performance Indicators*), que son objeto de comparación con los CTQI *Standard*, determinados a través del correspondiente ejercicio de *benchmarking*.

4.2.1. Producción

La primera de las categorías de medición del rendimiento operacional portuario es la producción, que expresa el volumen de mercancías manipuladas en un periodo de tiempo (jornada o turno de trabajo, día, mes, año,...) sin explicitar los recursos empleados. El volumen manipulado se puede medir en diferentes unidades como la tonelada, el contenedor (del tipo o medida que sea), el TEU, la plataforma, el euro, etc.

El indicador principal de esta categoría se denomina tráfico (*traffic*) o *throughput* de la terminal. En la literatura en inglés se encuentran, por un lado autores (De Monie, 1998 y Germanische Lloyd Certification, 2008) que los distinguen empleando definiciones particulares diferentes para estos dos términos, y por otro lado instituciones (las Auto-

ridades Portuarias en general, ESPO, 2011) y autores que los emplean como sinónimos. En la literatura en español también se utilizan ambos términos, en el caso de *throughput* normalmente sin traducir, con la divergencia comentada. Por ejemplo, en el caso del CTQI, bajo el término de tráfico se despliega un amplio conjunto de indicadores (importación, exportación, llenos, vacíos, etc. expresados en contenedores y en TEUs) y reserva el término de *throughput* como medición no estandarizada, empleada a nivel local con fines estadísticos, expresada en TEUs.

El sentido de la diferenciación obedece a la oportunidad de distinguir entre diversas mediciones de tráfico bruto –que incluyen las remociones o movimientos improductivos de la mercancía y otros– y de tráfico neto de la terminal o de un subsistema de ésta; y a otras cuestiones como la manera de contabilizar los contenedores de tránsito marítimo.

En el caso de las terminales de contenedores una unidad de producción muy relevante en el sistema analítico de medición es el “movimiento”. Así, por ejemplo en el subsistema de carga y descarga, se contabiliza como movimiento todo aquel vinculado con un ciclo de carga o descarga realizado por la grúa de muelle:

- Carga y descarga de contenedor/es (en función de la tipología del *spreader*);
- Remoción directa bordo/bordo;
- Remoción bordo/tierra y viceversa; y
- Carga y descarga de tapas de escotilla.

A partir de los indicadores de producción se construyen los indicadores financieros que expresan en unidades monetarias las distintas componentes de coste de la producción para cierto periodo temporal (€/t, €/movimiento de carga/descarga, €/movimiento de recepción/entrega, €/turno de trabajo, etc.).

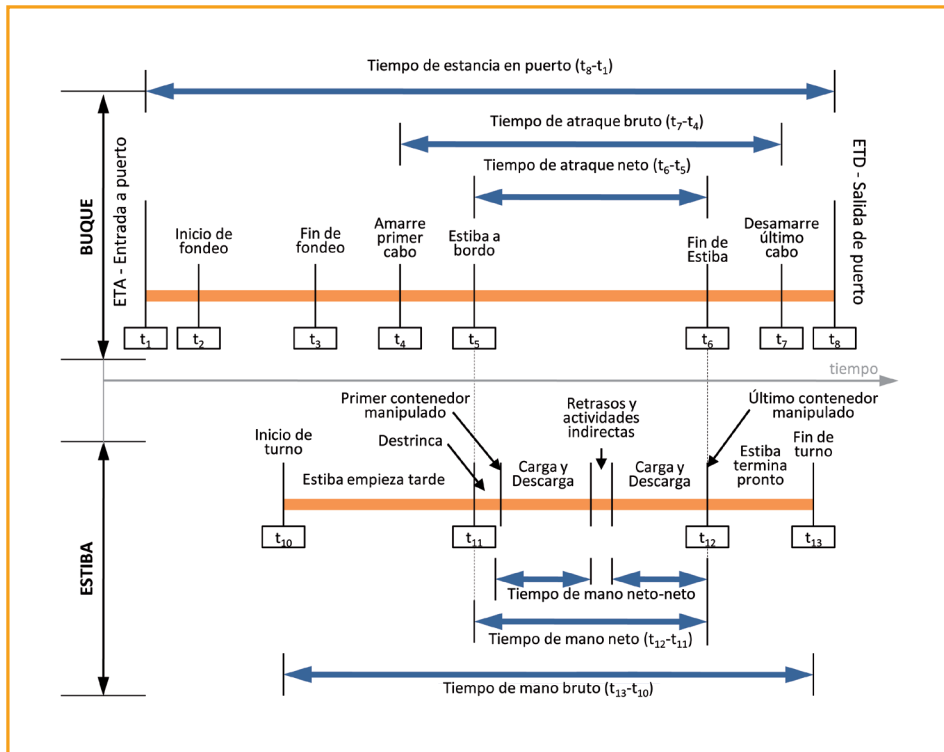
4.2.2. Productividad

La productividad expresa el volumen de mercancías manipulado por unidad de recurso y por unidad de tiempo.

Además de los recursos de infraestructura, superestructura y recursos humanos de la terminal, tanto el buque como los medios de transporte terrestre –camión o ferrocarril– son recursos de referencia para el cálculo del correspondiente indicador.

Por otra parte la unidad de tiempo se segmenta de acuerdo con la secuencia de la operación para mejorar el control, la programación y la productividad. Así, por ejemplo, en el caso del subsistema de carga y descarga se definen los tiempos que se identifican en la Figura 34.

Figura 34. Definiciones de tiempos en el subsistema de carga/descarga



Fuente: Ashar (1997)

En la Tabla 10 se recogen distintos ejemplos de indicadores de productividad con las respectivas unidades de producción, recurso y unidad de tiempo; y en la Tabla 11, a modo de ejemplo, se plasman las conexiones principales entre algunos objetivos habituales en una terminal portuaria y distintos indicadores de productividad.

Tabla 10. Ejemplos de mediciones de productividad

Productividad	Producción	Recurso	Ud de tiempo
Bruta en puerto	Movimientos	Buque/puerto	Horas en puerto
Bruta de atraque	Movimientos	Buque/atraque	Horas de atraque
Neta de atraque	Movimientos	Buque	Horas netas
Bruta de grúa	Movimientos	Grúa	Horas brutas
Neta de grúa	Movimientos	Grúa	Horas netas
Neta/neta de grúa	Movimientos	Grúa	Horas netas-netas

Fuente: Monfort et al. (2000)

Tabla 11. Conexión principal entre indicadores de productividad y objetivos

Indicador de Productividad	Mejora de la productividad del recurso grúa	Control de calidad de servicio a los navieros	Programación de atraques y equipos
Bruta en puerto		xxxxxxxxxx	
Bruta de atraque		xxxxxxxxxx	xxxxxxxxxx
Neta de atraque		xxxxxxxxxx	xxxxxxxxxx
Bruta de grúa	xxxxxxxxxx		xxxxxxxxxx
Neta de grúa	xxxxxxxxxx		
Neta/neta de grúa	xxxxxxxxxx		

Fuente: Monfort et al. (2000)

En el Capítulo 5 se dan referencias numéricas de valores de productividad (UNCTAD, 1998; Kent y Ashar, 2010).

4.2.3. Utilización

La utilización de los recursos de una terminal como categoría de medición del rendimiento operacional hace referencia a la proporción de tiempo que un recurso está en uso frente al tiempo total disponible para su uso en un periodo de tiempo, de ahí que la utilización sea siempre un valor adimensional (generalmente expresado en porcentaje).

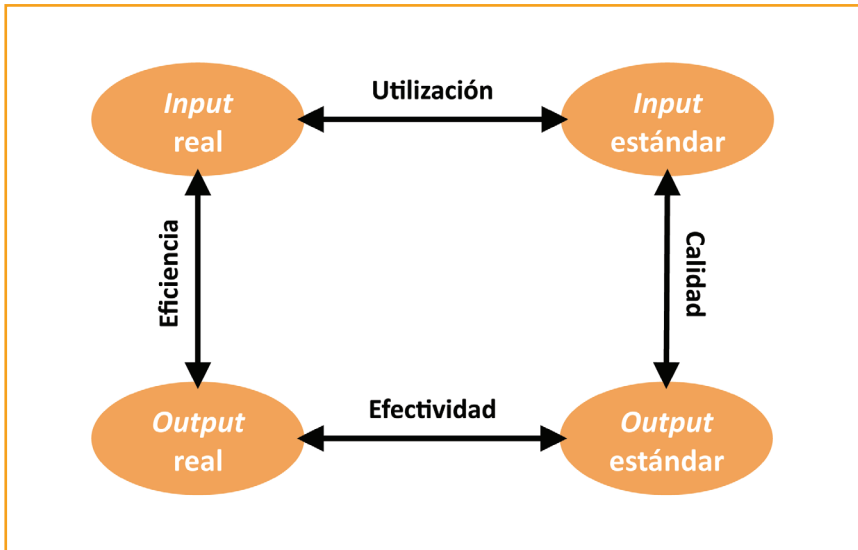
De entre todos los indicadores de utilización de infraestructura, es importante destacar el asociado al muelle, más conocido como tasa de ocupación. Este indicador alcanza valores distintos dependiendo de si se calcula de acuerdo con una explotación discreta o continua de la línea de atraque. En el primer caso refleja la proporción del tiempo en que los atraques están ocupados, independientemente del tamaño de los buques que allí están atracados, mientras que en el segundo refleja la proporción del tiempo que los metros de atraque están ocupados lo que depende directamente de la distribución de esloras de los buques.

4.3. Eficiencia

En el lenguaje coloquial, incluso en textos técnicos, los términos de eficiencia, eficacia, efectividad y productividad se emplean muchas veces como sinónimos. En todos los casos, implícita o explícitamente, hay detrás la valoración de un proceso de producción o transformación de recursos (*inputs*) en productos o resultados (*outputs*) y un objetivo referencial.

Bichou (2007) aporta con carácter ilustrativo –no exhaustivo– la matriz de la Figura 35, en el contexto de la referida taxonomía de términos relacionados con la medición del rendimiento operacional portuario, comentada en la introducción al presente capítulo respecto a la de medición del rendimiento portuario, distinta a la planteada por Brooks y Pallis (2007).

Figura 35. Matriz básica de dimensiones de medición del rendimiento



Fuente: Bichou (2007)

En el área de conocimiento del rendimiento portuario o *port performance*, el uso del concepto académico de eficiencia portuaria (González y Trujillo, 2006), que seguidamente se presenta, se intensifica desde mediados de la década de los noventa.

El uso de ratios que expresan el cociente entre un resultado (*output*) y un recurso (*input*) –definición alternativa de productividad– ha sido, y sigue siendo en muchos casos el procedimiento habitual a la hora de valorar el comportamiento –“la eficiencia”– en el uso de un recurso, sirviendo de base en ejercicios de planificación de los recursos necesarios.

Sin embargo, la definición académica de eficiencia, tratando de alcanzar una mejor interpretación de la realidad, siempre compleja, considera en el análisis múltiples *inputs* y *outputs* (Medal y Sala, 2011):

$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{Suma ponderada de outputs}}{\text{Suma ponderada de inputs}} \quad (1)$$

Las técnicas para el cálculo de la eficiencia, y en particular, el denominado DEA (*Data Envelopment Analysis*) o Análisis Envolvente de Datos se basan en la programación lineal y tienen por objetivo la evaluación de la eficiencia de un conjunto de unidades –terminales– de modo que el resultado es la eficiencia relativa de cada unidad respecto a todas las demás. Esta eficiencia se puede plantear en términos técnicos y en términos económicos.

Conviene resaltar la dificultad que puede suponer para una terminal el estudio de su eficiencia en tanto que necesita conocer la actividad de otras terminales de características similares a ella. Por ello, en muchas ocasiones se plantea el análisis de la eficiencia no en relación a otras terminales, sino respecto a ella misma, pero en diferentes periodos de tiempo. Es la denominada eficiencia intra-centro (Wang et al., 2005), en contraposición a la eficiencia inter-centro.

Si bien las referidas técnicas pueden resultar de interés en el análisis de la optimización de algunos recursos y resultados, las características descritas del análisis de eficiencia, en particular el hecho de que incorpore una valoración en términos relativos, limitan en gran medida su aplicabilidad cuando el objetivo del estudio es la estimación de la capacidad de la terminal.

4.4. Capacidad

La capacidad de una terminal portuaria puede definirse como el máximo tráfico al que puede dar servicio en un escenario definido. Dado que las condiciones en las que se puede calcular dicho máximo son diferentes, se tienen distintos conceptos de capacidad.

En cualquier caso, el proceso para su determinación obliga a realizar un modelo –necesariamente simplificado– del funcionamiento de la terminal, imaginar unas condiciones límites a las que someter el modelo, y calcular el indicador de tráfico correspondiente a ese escenario.

Así, y a lo largo del tiempo, han ido apareciendo diferentes condiciones límite para el cálculo de la capacidad, entre las cuales se pueden citar las siguientes:

- las ligadas a la optimización económica de las instalaciones;
- las fijadas por la saturación de las mismas; y,
- las correspondientes al mínimo admisible de la calidad de servicio percibida por los clientes, dado que al aumentar el tráfico la calidad del servicio percibida por los clientes de la terminal disminuye.

El cálculo de la capacidad es una importante herramienta de planificación de la terminal, pues no sólo permite encontrar los límites de la misma, sino también definir diferentes escenarios para ver cómo respondería la terminal a esas situaciones.

En el apartado que sigue se incluye la perspectiva de la medición del nivel de servicio basada en la estimación de la percepción de la calidad, elemento básico en el cálculo de la capacidad que se desarrolla en el Capítulo 5.

4.5. Nivel de Servicio

El concepto de Nivel de Servicio (NdS) ha sido desarrollado para proporcionar una medida de la calidad percibida por los clientes y usuarios del sistema. Por otro lado facilita la introducción de un escenario de condiciones límite que conlleva el cálculo de capacidad portuaria.

Los clientes y usuarios de la terminal portuaria son la compañía naviera (buque), el transportista terrestre (camión y ferrocarril) y los cargadores (mercancía).

En líneas generales, la naviera, principal cliente de la terminal, percibe la calidad recibida a través de dos dimensiones diferentes, expresables en términos económicos. La primera de ellas es el coste de la escala, es decir el del conjunto de las cantidades que, en forma de tasas o tarifas, tiene que abonar cada vez que los buques pasan por el puerto. Aunque es una dimensión muy importante, queda fuera de los objetivos de este manual. La segunda tiene que ver con el tiempo que emplea en hacer escala en el puerto, mejor cuanto menor sea éste.

El problema se plantea cuando se debe seleccionar un indicador para medir el nivel de satisfacción respecto al tiempo de escala. Sin duda una de las principales variables es el volumen de mercancías a manipular. De hecho, el indicador operacional más empleado por las navieras es el volumen de mercancías movilizadas por unidad de tiempo en puerto.

Consecuentemente, un indicador de nivel de servicio especialmente relevante ofrecido a las navieras es el ratio:

$$\frac{T_p}{Q} \quad (2)$$

Donde:

- T_p : Tiempo de estancia del buque en puerto (duración de la escala)
- Q : Cuantía de mercancías a mover en una escala en puerto

Por otro lado, el tiempo de estancia en puerto tiene tres componentes muy diferenciadas:

$$T_p = T_e + T_m + T_s \quad (3)$$

Donde:

- T_e : Tiempo de espera (fondeo), que por motivos de congestión portuaria debe esperar el buque para ser atendido;
- T_m : Tiempo de maniobra desde la posición de entrada o fondeo hasta el atraque; y
- T_s : Tiempo de servicio, o tiempo de atraque bruto, es decir, el tiempo en el que el buque está atracado.

Prescindiendo del tiempo de maniobra, que es característico del *layout* y de las condiciones de operación del puerto, y que en cualquier caso debe minimizarse, la expresión anterior queda en términos de los tiempo de estancia y de servicio:

$$\frac{T_p}{Q} = \frac{T_s}{Q} \left(1 + \frac{T_e}{T_s}\right) \quad (4)$$

Minimizar el ratio T_p/Q (medida de la satisfacción de la naviera relacionada con el tiempo de escala en puerto), conllevará minimizar la expresión anterior.

Conocer la capacidad de una terminal implica conocer los límites que las navieras pueden admitir en términos de tiempo de espera respecto al de servicio, relación que se expresa en el ratio denominado **espera relativa ϵ** :

$$\varepsilon = \frac{T_e}{T_s} \quad (5)$$

expresión de la **calidad de servicio** asociada a la espera relativa.

Asimismo, en la fórmula anterior se observa que el primer término (T_s/Q) es la inversa de la productividad del buque en el atraque:

$$P = \frac{Q}{T_s} \quad (6)$$

Donde:

P: Productividad del buque atracado (en la que influyen principalmente el número y prestaciones de las grúas, la pericia de los manipuladores, la conexión con los otros subsistemas y la gestión de la información, entre otros factores).

Por lo tanto, la expresión (4) queda:

$$\frac{T_p}{Q} = \frac{1}{P} (1 + \varepsilon) \quad (7)$$

Ésta tiene dos factores, uno básico gobernado por la productividad de atraque *P*, y un segundo factor amplificador del anterior, que representa el efecto de la congestión de la terminal, y que puede ser estimado por la mencionada espera relativa ε .

Como resumen de lo anterior, queda explícito que el indicador de nivel de servicio ofrecido a la naviera (medida de la satisfacción del cliente) es función de dos indicadores fundamentales: por un lado, la productividad del buque atracado *P*, y, por otro la espera relativa ε .

En el caso del usuario transportista terrestre (camión o ferrocarril) el planteamiento es similar, aunque más sencillo. En particular, en el caso del camión, el número de operaciones a realizar está muy acotado (recepción/entrega de 1 o 2 contenedores como máximo), y el tiempo total de la operación, suma del tiempo de espera y gestión en las puertas de entrada y en el interior de la terminal, deberá estar relacionado con tal número de movimientos.

Por otra parte, la duración de la estancia de las mercancías en la terminal se puede utilizar como índice de calidad en el caso de los cargadores (importadores y exportadores). Sin embargo, el tiempo de estancia no es consecuencia, en general, de la gestión de la terminal y obedece a factores exógenos, entre los que puede citarse el propio interés del cargador de emplear el depósito portuario a modo de almacén regulador. Otros factores exógenos que pueden afectar a la duración de la estancia son las tarifas de almacenamiento y el funcionamiento de los organismos aduaneros y de inspección.

Por último, cabe mencionar que el concepto de NdS se emplea en muchas otras actividades en las que se trata de medir la satisfacción de los usuarios. Para representar el NdS es habitual definir un conjunto reducido de rangos o intervalos (niveles), unas veces denominados por letras y otras por números. Un ejemplo a destacar es el contemplado en el Manual de Capacidad de Carreteras (Transportation Research Board, 2000), en el que los NdS se representan por 5 letras de la A (el mejor) a la E (el peor), donde el paso del nivel D al E corresponde, por definición, con la capacidad de la infraestructura.

En el caso de las terminales portuarias, a la fecha no se dispone de un modelo completo de NdS como en el referido caso de las carreteras. Ballis (2003) aporta un ejercicio preliminar para el caso de terminales intermodales (Tabla 12).

En el Capítulo 5 se profundiza en el estudio de los indicadores de rendimiento y niveles de servicio para terminales de contenedores (ver Tabla 17 y Tabla 18). Finalmente se realiza una propuesta de Niveles de Servicio utilizando para ello rangos de valores de la espera relativa y de la productividad anual media de buque atracado (P) (véase Tablas 22, 23 y 24).

Tabla 12. Propuesta de Nds para terminales intermodales

Propuesta de Estándares de Niveles de Servicio para terminales intermodales						
	A	B	C	D	E	F
SISTEMA DE DEMORAS						
Tiempo de espera de los usuarios en el sistema (incluye tiempo de espera en cola y tiempo de servicio)						
Tiempo de espera para el 95% de los camiones (minutos)	Más de 19	20 - 30	31 - 40	41 - 60	61 - 120	
El tiempo de espera de los buques debe estar de acuerdo con la naviera y con las normas del puerto, mientras que los trenes deberían seguir su propio horario (las desviaciones son asumidas por el estándar de fiabilidad)						
Fiabilidad						
Terminales Marítimas						
Incidentes por demora en la salida de buques	más de 2%	(3 - 5) %	(6 - 15) %	(16 - 30) %	(31 - 60) %	
Duración de la demora (minutos)	más de 30	31 - 45	46 - 60	61 - 90	91 - 180	
Terminales de ffcc						
Incidentes por demora en la salida de trenes	más de 2%	(3 - 5) %	(6 - 10) %	(11 - 20) %	(21 - 40) %	
Duración de la demora (minutos)	más de 10	11 - 20	21 - 30	31 - 40	41 - 60	

Fuente: Ballis (2003)

Si su lógica es perfecta pero sus datos son falsos, entonces sus conclusiones serán inevitablemente erróneas

Christie-Davis, ingeniero



Medición de la capacidad de las terminales portuarias

5.1. Métodos de medición

Los métodos para la determinación de la capacidad de una terminal portuaria han ido evolucionando, desde simples fórmulas basadas en productividades medias a modo de ratios (métodos empíricos), a otros más complejos (métodos analíticos), que en una fase inicial se apoyaron en la teoría de colas (Rodríguez, 1977), y que han desembocado en metodologías de simulación en las que resulta determinante conocer cómo va a evolucionar en su conjunto la terminal ante demandas crecientes de tráfico y otros escenarios actuales y futuros objeto de análisis.

En los **métodos empíricos**, la capacidad se obtiene aplicando a la terminal portuaria índices de productividad que resultan del *benchmarking* de instalaciones de tamaño y tipología similar a la estudiada que ofertan un nivel de servicio adecuado. Son métodos muy útiles a la hora de planificar nuevas terminales y desarrollar planes directores portuarios (Schreuder, 2005), puesto que en muchas ocasiones no hay datos disponibles para la aplicación de métodos más complejos.

Los **métodos analíticos** utilizan conceptos y formulaciones matemáticas para describir los procesos del subsistema en cuestión. Son muy utilizados en el caso de la planificación del subsistema de línea de atraque

(Rodríguez, 1977; UNCTAD, 1984; Agerschou, 2004; Dragovic et al., 2006; entre otros).

Tal y como se introduce en el capítulo anterior, para estimar la capacidad de una terminal por línea de atraque se hace necesario conocer los límites que las navieras pueden admitir en la relación entre el tiempo de espera y el de servicio, conocida como espera relativa, para una adecuada productividad de buque atracado. El subsistema de carga y descarga de buques o de línea de atraque se suele explotar como una única línea continua, quedando así lejos de la simplificación que la teoría de colas exige de entenderlo como un grupo de puestos de atraques equivalentes, que atienden a buques idénticos. El muelle suele ser, en su caso más sencillo y habitual, una alineación más o menos uniforme (podría haber múltiples alineaciones o tramos de calados diferentes que complicarían notablemente el estudio) a la que llegan barcos de tamaños y necesidades de servicio diferentes. La simulación se plantea como el único modo de profundizar en su conocimiento, lo que exige a su vez estudiar muchos aspectos que la simplificación de los métodos analíticos oculta.

Hay dos tipos de simulación, determinista (una foto) y estadística (o estocástica). En las TCs la segunda es la más usada, debido a la complejidad de éstas. Los **métodos de simulación** tienen el objetivo de reproducir el comportamiento de la terminal ante un conjunto de escenarios, mediante programas computacionales. En la simulación, el sistema terminal se divide en diversos subsistemas que pueden describirse matemáticamente, y que luego se combinan para obtener un modelo del sistema completo y así poder evaluar los diferentes escenarios planteados. Los métodos de simulación presentan ventajas sobre los modelos analíticos por considerar un alto nivel de detalle y evitar, como se ha comentado, las excesivas simplificaciones de estos últimos. El inconveniente es la enorme cantidad de datos necesarios para su desarrollo y utilización.

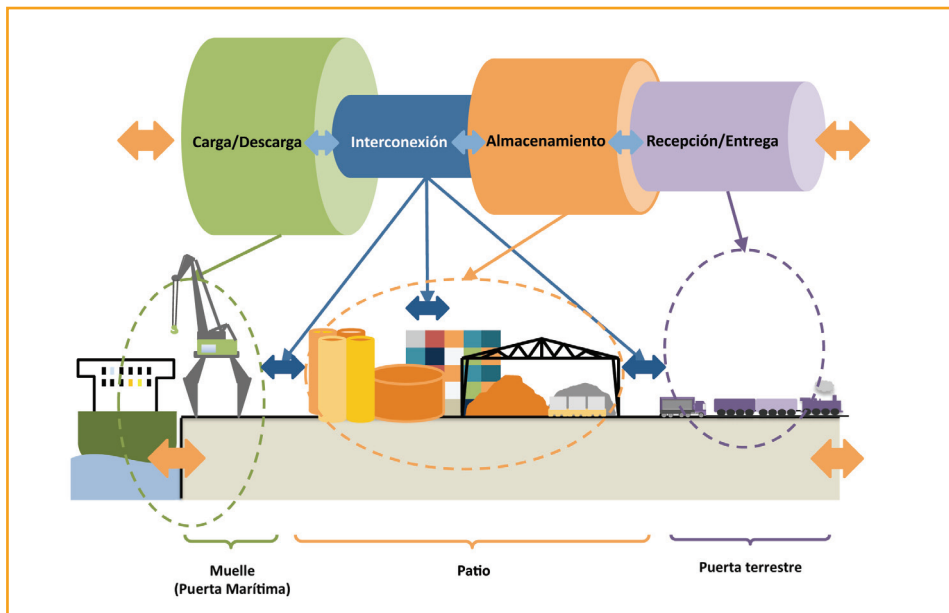
El nivel de detalle en los componentes y el comportamiento del modelo (o modelos) de simulación vendrá determinado por el uso que se pretenda dar al mismo. Normalmente hay que buscar una solución de compromiso que equilibre la complejidad del modelo –nivel de detalle– y su uso –objetivos–. En la explotación de una terminal portuaria de contenedores existen diferentes aspectos a nivel estratégico, táctico y operativo, con distintos horizontes temporales y necesidades de detalle en los modelos de simulación (Henesey, 2006). Por lo tanto, se pueden definir tantos niveles de abstracción como se quiera o se necesite (Sanz et al., 2010). Así, si se divide un modelo en varios niveles de complejidad creciente, el nivel 1 es el grupo de simulaciones de menor grado de complejidad y por tanto mayor grado de abstracción y, el último nivel se corresponde con la mayor complejidad y menor grado de

abstracción. Finalmente, es importante mencionar que, cuanto más complejo y detallado sea un modelo de simulación, la necesidad de computación crece, lo que puede limitar su utilidad si no es capaz de dar una respuesta en un tiempo aceptable.

5.2. El cálculo analítico por subsistemas: hipótesis

En una concepción sistémica interna de una terminal portuaria (Capítulo 2), su capacidad va a ser la menor de las respectivas capacidades de los subsistemas que la integran (Figura 36): subsistema de carga y descarga de buques (línea de atraque), subsistema de interconexión, subsistema de almacenamiento y subsistema de recepción y entrega terrestre. Es evidente que se trata de una visión analítica simplificada puesto que los subsistemas interactúan de manera natural (véase Apartado 3.2) de modo que el planteamiento va a requerir la generación de una serie de hipótesis de trabajo que permitan el aislamiento de cada subsistema para el cálculo de su capacidad.

Figura 36. Capacidad de la terminal portuaria por subsistemas



Fuente: Fundación Valenciaport basado en Henesey (2006)

Desde la perspectiva planificadora, ni el subsistema de interconexión ni el de recepción y entrega deben ser los limitantes de la capacidad por cuanto la hipótesis de trabajo es que estos se dotan del equipamiento suficiente como para no convertirse en cuellos de botella del sistema terminal.

El subsistema de interconexión se encarga del traslado interior de las mercancías entre los demás subsistemas. En este análisis se supone que el número de equipos de interconexión es el necesario para realizar el trabajo, de modo que no retrasan la actividad el equipo de carga y descarga del buque, ni la del equipo de patio, y por tanto se considera que no puede ser limitante de la capacidad de la terminal.

En el caso del subsistema de recepción y entrega hay que distinguir la operación de acceso de camiones externos o del ferrocarril a la terminal, de la propia operación de recepción y entrega. En el caso de los camiones externos, el flujo de acceso depende del número de puertas, del horario de las mismas y del tiempo requerido en la operación de entrada o salida (este aspecto es muy importante, principalmente, en las terminales con gran volumen de tráfico de contenedores origen/destino (O/D) terrestre). Se supone que el operador de la terminal dimensiona el número de puertas en función de la afluencia de camiones externos –variable a lo largo del día–, y que en ningún caso el acceso o la salida de la terminal deben limitar la capacidad del subsistema de recepción y entrega, que, como se ha indicado, deberá estar convenientemente dotado de los correspondientes recursos. En el caso del ferrocarril, se supone que la terminal tendrá el número de vías suficientes para atender el tráfico de entrada y salida de las mercancías por este medio. Sin embargo, lo que puede limitar la capacidad del subsistema de recepción y entrega, es el dimensionamiento de los equipos que muchas veces se comparten con la operativa de otros subsistemas. En el caso de las terminales de graneles en las que la operativa de recepción y entrega de la mercancía se realiza mediante tuberías u otras instalaciones especiales, éstas estarán dimensionadas correctamente para que dicho subsistema no sea tampoco un limitante de la capacidad de la terminal.

Asimismo, en el análisis de la capacidad del subsistema de carga y descarga de buques hay que distinguir dos operativas diferentes: la de atraque (función, fundamentalmente, del número de atraques y de la tasa de ocupación del muelle); y la de carga y descarga del buque propiamente dicha (que depende principalmente del número de grúas y de los equipos de interconexión asignados, y de sus productividades). En el análisis aquí presentado

se supone que la terminal cuenta con el número de equipos necesarios para atender el tráfico y que la productividad de los mismos está dentro de unos valores aceptables. Por lo tanto, la capacidad de carga y descarga se relaciona con la capacidad de la línea de atraque a través de la productividad de buque atracado (véase Apartado 5.3.1.).

El subsistema de almacenamiento es el que regula los diferentes ritmos entre el transporte marítimo y el terrestre (camión y ferrocarril). El cálculo de la capacidad de este subsistema es más complejo de lo que cabría esperar y es función de: el espacio dedicado al almacenamiento, la altura operativa media de apilado –relacionada con el equipamiento, el tráfico y el TOS– y el tiempo de estancia de las mercancías. Algunos autores (Kent y Ashar, 2010) también desestiman el subsistema de almacenamiento como limitante de la capacidad de la terminal razonando, por ejemplo, que el tiempo de estancia de las mercancías resulta determinante para la capacidad del subsistema –como es bastante intuitivo–, centrándose en la capacidad por línea de atraque como único factor limitante de la capacidad, dado que tal tiempo puede “gestionarse” con medidas tarifarias y de tipo logístico. En el presente Manual se mantiene el análisis de capacidad de almacenamiento por su interés para el planificador y para la mejora de la gestión de la terminal, ya que en muchas ocasiones las referidas medidas de gestión del tiempo de almacenamiento no son fáciles de implementar.

A continuación se pasa a describir la metodología de cálculo de la capacidad por línea de atraque y de almacenamiento de las instalaciones portuarias, por ser, como ya se ha comentado, los dos subsistemas que condicionan la capacidad del conjunto de la terminal. Además, se hace una particularización en ambos casos para las terminales portuarias de contenedores.

5.3. Capacidad por línea de atraque

La metodología que presenta el presente Manual para el cálculo de la capacidad por línea de atraque es híbrida: combina el cálculo analítico con la simulación para tal subsistema.

5.3.1. Definición

Los aspectos principales a tener en cuenta para el cálculo de la capacidad por línea de atraque en una terminal o instalación portuaria son:

- Las previsiones de volúmenes de mercancías a manipular (demanda) según su forma de presentación (granel líquido, granel sólido, contenedor, mercancía general no contenedorizada, Ro-Ro).
- La distribución estadística de las llegadas de los buques y sus características (esloras y calados).
- La caracterización de las alineaciones de atraque (longitudes y calados).
- La distribución estadística del tiempo de servicio.
- La productividad de los equipos de muelle (toneladas/hora; TEUs/hora o contenedores/hora; unidades/hora) y el número de éstos (calidad asociada a la productividad de buque atracado).
- El nivel de calidad de servicio asociado a la espera relativa considerado como admisible.
- El tiempo operativo de la terminal al año.

La capacidad anual de la línea de atraque es igual al producto del número de puestos de atraque, por la tasa de ocupación del muelle, por las horas operativas anuales, y por la productividad horaria media de los buques durante su atraque:

$$C_{LA} = n \times \phi \times t_{año} \times P$$

Donde,

- C_{LA} : Capacidad anual de la línea de atraque (toneladas, contenedores o TEUs, unidades por año).
- n : Número de puestos de atraque.
- ϕ : Tasa de ocupación admisible. Es función del número de puestos de atraque, de la calidad de servicio asociada a la espera relativa y de la caracterización de las llegadas y los tiempos de servicio.
- $t_{año}$: Horas operativas de la terminal al año. Es función de los días que opera el puerto y de las condiciones laborales (turnos diarios, número de horas por turno, etc.) y meteorológicas.
- P : Productividad anual media de buque atracado. Resulta del cociente entre el volumen anual de mercancías a manipular y la suma de los tiempos brutos anuales de atraque estimados. Es función del número y prestaciones de los equipos empleados, la pericia de los manipuladores y la conexión con los otros subsistemas, entre otros factores.

El **número puestos de atraque (n)** no tiene por qué ser un número entero si bien en muchas ocasiones el cálculo que seguidamente se detalla se redondea al entero inferior con objeto de calcular una capacidad que quede del lado de la seguridad. El número de puestos de atraque es función de la longitud de la línea de atraque, de la eslora del buque tipo que atracará en la terminal (ver Anexo 1, Apartado 3 sobre la modelización del atraque) y de los resguardos de seguridad (o coeficiente de separación, $K_{separación}$) entre buques.

En la bibliografía existen varias propuestas para el cálculo de n :

$$n = \frac{\text{longitud de línea atraque}}{\text{eslora buque tipo} \times (100\% + K_{separación})}$$

En la literatura especializada no existe un acuerdo sobre la definición del “buque tipo”. Así, mientras algunos autores (González-Herrero et al., 2006) proponen el uso de buques extremales, por ejemplo el buque cuya eslora es excedida sólo por el 15% de las llegadas, otros autores proponen valores medios, ya sea la media de las esloras (Rodríguez, 1977), o la media ponderada de la distribución de esloras por los respectivos tiempos de servicio (distribución de tiempos de servicio). En el caso de no disponer de la información necesaria (distribuciones de esloras y distribuciones de tiempos de servicio), se puede estimar la eslora en función de la tipología de buques que está previsto que atraquen en la terminal, como por ejemplo buques porta-contenedores *panamax*, *post-panamax*, etc. (ver Tabla 13), o según su ubicación respecto a las rutas de transporte marítimo, el calado del puerto, etc.

Tal y como se ha mencionado, para el cálculo de n la eslora del buque tipo debe incrementarse en un resguardo. Existen varias formas de calcular ese valor, por ejemplo el 10% de la eslora del buque tipo repartido entre la popa y la proa ($K_{separación} = 10\%$), o un valor fijo (por ejemplo 20 metros). La ROM hace una propuesta considerando varias configuraciones de muelle (ver Anexo 2).

Tabla 13. Capacidad de la línea de atraque según tipos de atraque (análisis "Caso Chile")

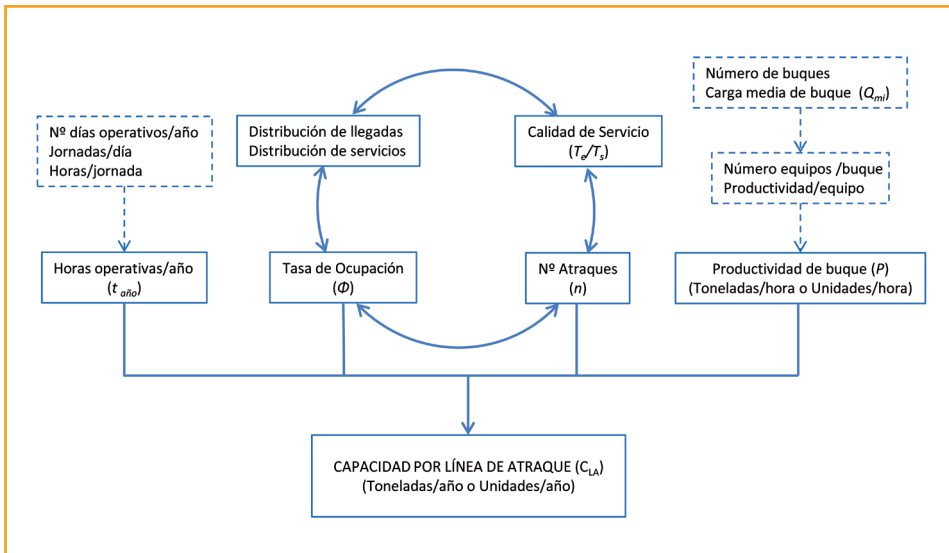
Año	Tipo de atraque	Longitud de atraque (m)	Calado (m)	Atraques por terminal	Buque de diseño (TEUs)	Capacidad anual de atraque (TEUs)	Capacidad por metro de atraque (TEUs/m)
2009	Sub Panamax	250	12	3	3.000	350.000	1.400
2012	Panamax	280	14	3	4.500	450.000	1.607
2012	Panamax	280	14	4	4.500	495.000	1.768
2014	Post Panamax I	300	15	3	5.700	500.000	1.667
2014	Post Panamax I	300	15	4	5.700	550.000	1.833
2017	Post Panamax II	350	16	4	8.000	700.000	2.000
2025	Post Panamax III	400	16 - 18	4	12.000	1.000.000	2.500
2009	Polivalente	150	10 - 11	2	1.000	100.000	667

Fuente: Ashar (2009)

La **tasa de ocupación admisible** (ϕ) resulta de considerar, por una parte, la distribución de las llegadas de los buques, la distribución de los tiempos de servicio en el muelle y n ; y por otra, la calidad de servicio ofertada vinculada a la espera relativa. La tasa de ocupación se puede calcular mediante la utilización de la Teoría de Colas o por medio de modelos de simulación.

La Figura 37 esquematiza los elementos clave que deben tenerse en cuenta a la hora de calcular la capacidad por línea de atraque, así como la relación entre ellos.

Figura 37. Capacidad por línea de atraque de las terminales portuarias



Fuente: Fundación Valenciaport

5.3.2. Recomendaciones sobre capacidad por línea de atraque

5.3.2.1. Sistemas de distribución de llegadas de buques y de tiempos de servicio en función de la tipología de la terminal

Para el análisis detallado de la capacidad de la línea de atraque utilizando métodos analíticos y de simulación, es necesario conocer la distribución de llegadas de buques y la distribución de tiempos de servicio de la terminal. En estos métodos el muelle o la terminal son tratados como un sistema de espera dotado de n puestos de servicio (en este caso serían n atraques), con una función de distribución de probabilidades de llegadas de buques (f_1) y otra función de distribución de probabilidades de tiempo de servicio (f_2). El sistema de espera queda definido por estas distribuciones (la de llegadas y la de tiempos de servicio) y el número de atraques: $f_1/f_2/n$. Las funciones de distribución pueden ser exponenciales (M –también llamadas de Poisson, marcovianas o aleatorias–), Erlang de orden K (E_K), constantes (D), hiperexponenciales (H), u otra cualquiera (G).

A falta de un mejor conocimiento de la caracterización del muelle o de la terminal en términos de distribuciones de llegadas y de tiempos de servicios, se recomienda utilizar los siguientes sistemas según la tipología de la terminal (UNCTAD, 1984; MOPT, 1992; Arnau, 2000; Thoresen, 2003; Agerschou, 2004; González-Herrero et al., 2006; OPPE, 2006; y Aguilar y Obrer-Marco, 2008):

- Para el caso de **terminales de graneles**:
 - **Terminal pública: $M/E_2/n$** (distribución de llegadas aleatorias/ distribución de tiempos de servicio Erlang 2, E_2 , y n atraques)
 - **Terminal con escalas muy programadas: $E_K/E_K/n$** (distribución de llegadas y de tiempos de servicio según una distribución Erlang de orden K para n atraques).
- Para el caso de **terminales polivalentes**, dependiendo del tipo de mercancía y su distribución, el sistema podría variar entre:
 - **$M/M/n$** (distribución de llegadas aleatorias/ distribución de tiempos de servicio aleatorios/ n atraques) y
 - **$E_2/E_2/n$** (distribución de llegadas y de tiempos de servicio según una distribución Erlang de orden $K=2$ para n atraques).

- Para el caso de **terminales de contenedores**:
 - **Terminales públicas: $M/E_K/n$** (distribución de llegadas aleatorias / tiempos de servicio según una distribución Erlang de orden K / n atraques). Recientes estudios empíricos demuestran que las terminales públicas de contenedores obedecen a una distribución de llegadas de buques aleatorias (M) y los tiempos de servicio se ajustan más a una Erlang de orden 4 (E_4) o superior (cuanto más regulares sean los tiempos de servicio de la terminal mayor deberá ser el valor de K) – $M/E_4/n$.
 - **Terminal con escalas muy programadas: $E_K/E_K/n$** (distribución de llegadas y de tiempos de servicio según una distribución Erlang de orden K para n atraques), con menor aleatoriedad en la distribución de llegadas. En relación con las funciones de distribución de llegadas para terminales dedicadas, unos autores las identifican con llegadas aleatorias (Kou et al., 2006; Aguilar y Obrer-Marco, 2008) y otros con llegadas más regulares como Erlang de orden 2 (Agerschou, 2004).

5.3.2.2. Definición de la tasa de ocupación

Como se ha comentado la tasa de ocupación se puede calcular mediante la utilización de la Teoría de Colas o por medio de modelos de simulación. En la literatura específica (UNCTAD, 1984; MOPT, 1992; Thoresen, 2003; Agerschou, 2004; González-Herrero et al. 2006; OPPE, 2006, entre otros), existen diversas recomendaciones –unas más rigurosas que otras– para definir la tasa de ocupación admisible o la calidad de servicio asociada a la espera relativa aceptable de las terminales portuarias.

Es importante destacar que **la tasa de ocupación admisible va asociada a un número de atraques, lo que se traduce en una determinada calidad de servicio asociada a la espera relativa (T_e/T_s) dependiendo del sistema que se ajuste a la terminal**, es decir, de las distribuciones de llegadas y de tiempo de servicio a los buques. En otras palabras, para una misma espera relativa, en función de la caracterización del sistema ($M/M/n$, $M/E_K/n$ o $E_K/E_K/n$) y del número de atraques, se obtienen distintas tasas de ocupación admisibles. Sin embargo, algunas referencias bibliográficas sobre ese tema erróneamente no hacen mención a dicha caracterización del sistema (para cada tipología de terminal), y muchas veces tampoco a la calidad de servicio llegando incluso a no mencionar la obvia dependencia de Φ respecto al número de atraques.

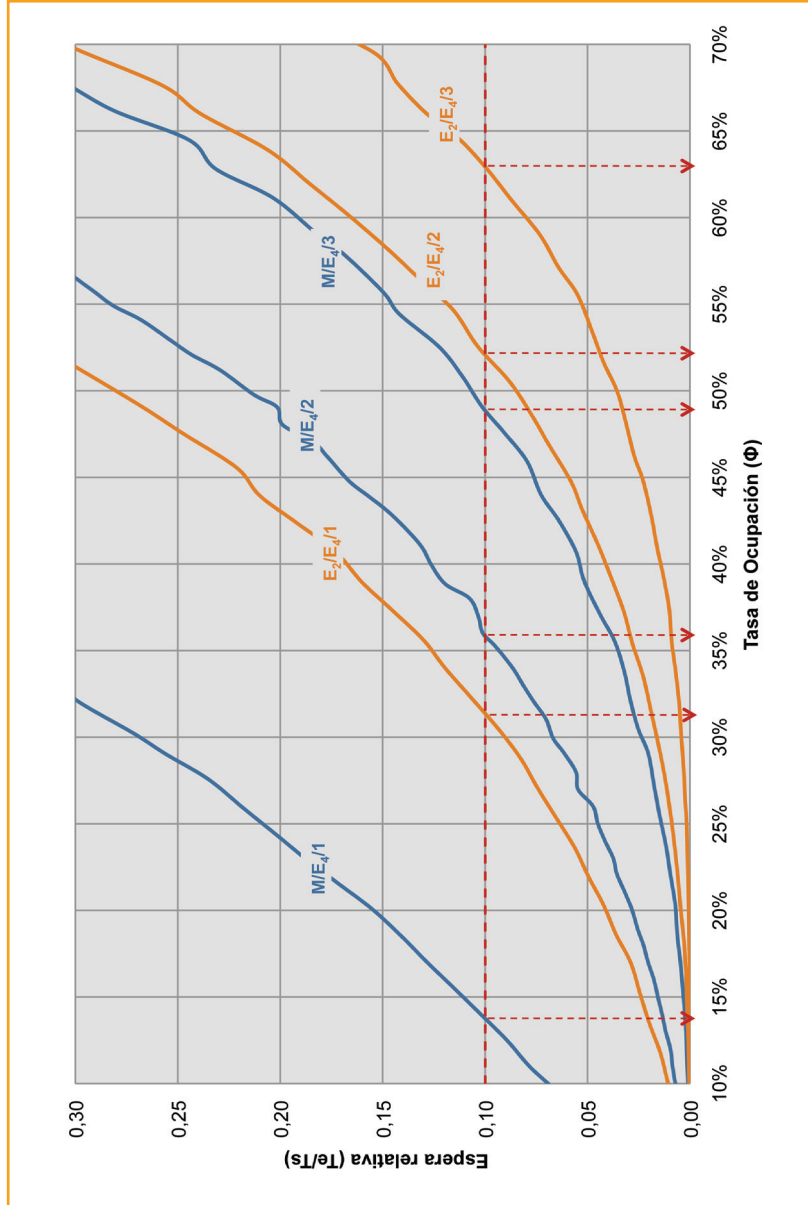
Por lo tanto, tal y como muestra el Gráfico 1, para una espera relativa de 0,10, es decir, un tiempo de espera del 10% del tiempo de servicio, en una terminal con un sistema $M/E_4/n$, la tasa de ocupación admisible está en torno al 14% para el caso de un puesto de atraque y pasa a ser del 36% y 49% para dos y tres atraques respectivamente. Sin embargo, en una terminal dedicada, con un sistema $E_2/E_4/n$, las tasas de ocupación para esa misma calidad de servicio son, aproximadamente, del 31%, 53% y 63%, para 1, 2 y 3 atraques respectivamente (Tabla 14). Es importante mencionar que una terminal, por más atraques que tenga, nunca podrá alcanzar una tasa de ocupación del 100%, puesto que esto correspondería a un tiempo de espera medio “infinito” de los buques en cola.

Tabla 14. Ejemplo de la influencia de la caracterización del sistema y del n° de atraques en la tasa de ocupación para cierto nivel de calidad de servicio asociada a la espera relativa

Φ (para $T_e/T_s = 0,10$)	n=1	n=2	n=3
$M/E_4/n$	14%	36%	49%
$E_2/E_4/n$	31%	53%	63%

Fuente: Fundación Valenciaport a partir de los datos de Agerschou (2004) y Aguilar y Obrer-Marco (2008)

Gráfico 1. Espera relativa (T_i/T_j) y tasa de ocupación en función del sistema ($M/E_i/n$ y $E_i/E_j/n$) para 1, 2 y 3 atraques



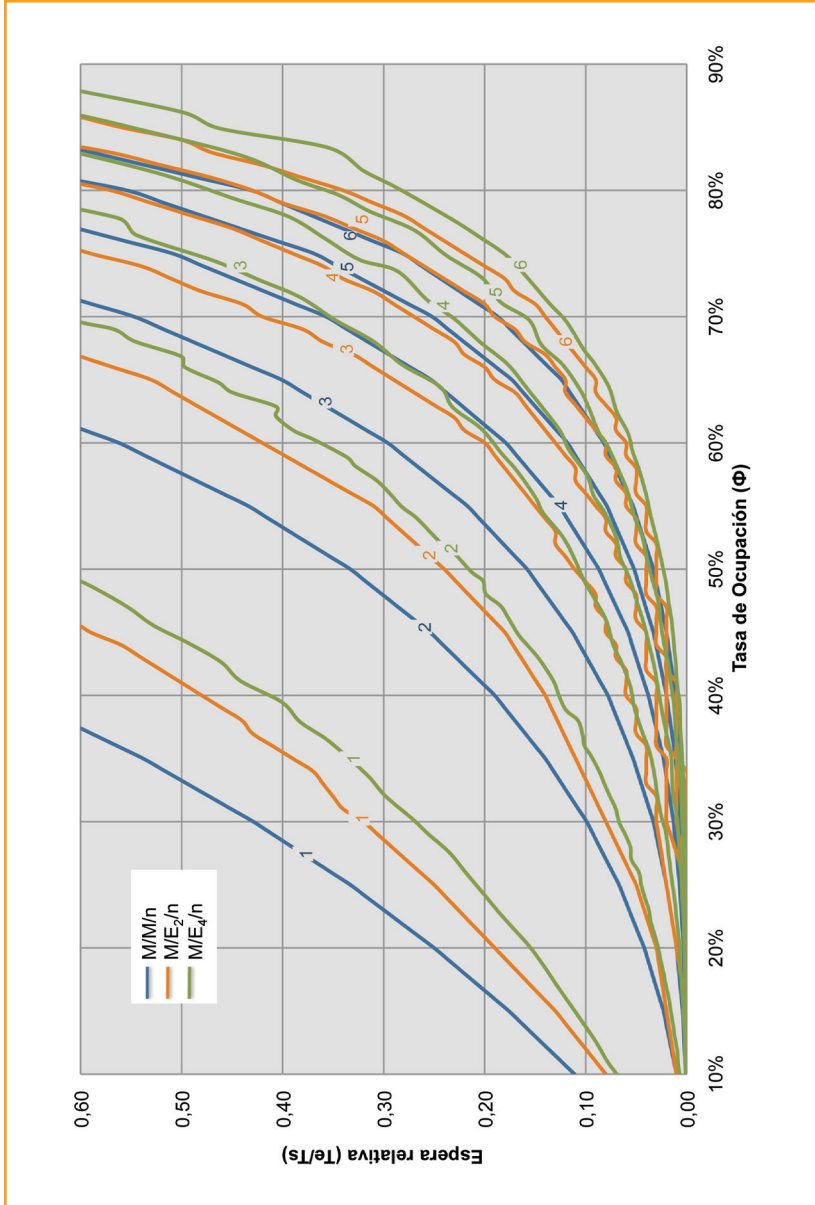
Fuente: Fundación Valenciaport a partir de los datos de Agerschou (2004) y Aguilar y Obrer-Marco (2008)

Según Agerschou (2004), algunos estudios de viabilidad económica indican que en el caso de las terminales de contenedores, el tiempo de espera no debe ser mayor que el 10% del tiempo de servicio. Por su parte, Thoresen (2003) menciona que el ratio T_e/T_s debe estar entre el 5% y el 20% en función del tipo de terminal; y que la ocupación del muelle depende también del tipo de muelle, del tamaño de los buques, del equipamiento de transferencia, de las condiciones medioambientales, etc. De acuerdo con la ROM 2.1 (González-Herrero et al. 2006), para terminales polivalentes se recomienda un valor de $T_e/T_s=0,25$, y para las terminales de graneles un valor $T_e/T_s=0,50$. Sin embargo, en este último caso, dependiendo de la tipología de la terminal de graneles (una terminal dedicada, por ejemplo), podría tener que considerarse un valor de T_e/T_s inferior (mejorando la espera relativa).

Por otra parte, a la hora de decidir la calidad de servicio a ofertar en las instalaciones, conviene no olvidar que una de las referencias a tener en cuenta es el valor de la oferta de calidad de las instalaciones de la competencia.

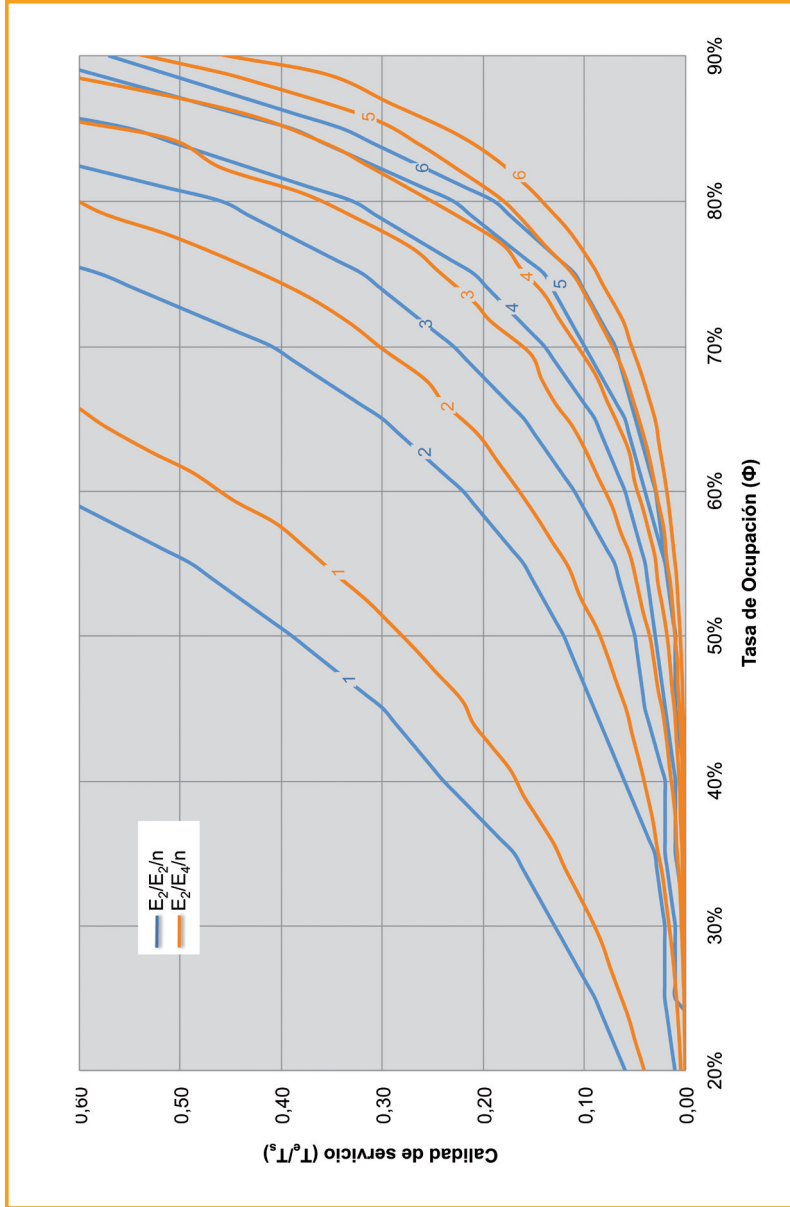
De acuerdo con la revisión bibliográfica anterior y con el estudio de simulación de la línea de atraque realizado por Aguilar y Obrer-Marco (2008), se han podido trazar las curvas de los sistemas $M/M/n$, $M/E_2/n$ y $M/E_4/n$, representadas en el Gráfico 2, y de los sistemas $E_2/E_2/n$ y $E_2/E_4/n$, representadas en el Gráfico 3.

Gráfico 2. Correspondencia de las tasas de ocupación y la espera relativa de los sistemas $M/M/n$, $M/E_2/n$ y $M/E_4/n$ de 1 a 6 atraques



Fuente: Fundación Valenciaport a partir de datos de UNCTAD (1984), Agerschou (2004) y Aguilar y Obrer-Marco (2008)

Gráfico 3. Correspondencia de las tasas de ocupación y la espera relativa de los sistemas $E_2/E_1/n$ y $E_4/E_3/n$ de 1 a 6 atraques



Fuente: Fundación Valenciaport a partir de datos de UNCTAD (1984), Agerschou (2004) y Aguilar y Obrer-Marco (2008)

En las Tablas 15 y 16 se sintetizan las recomendaciones de las tasas de ocupación admisibles en función del número de atraques (de 1 a 6 atraques) y del sistema de distribución de llegadas y de tiempos de servicio de las terminales, para una determinada espera relativa. Se observa que, como es lógico, con mayor espera relativa, es decir mayor T_e/T_s , se alcanzan tasas de ocupación más elevadas.

Tabla 15. Recomendaciones para la tasa de ocupación admisible (Φ) en función del número de atraques y del sistema para terminales polivalentes ($T_e/T_s = 0,25$) y terminales de graneles ($T_e/T_s = 0,50$)

Nº de atraques (n)	Tasa de ocupación admisible Φ (%)			
	Terminal Polivalentes $T_e/T_s = 0,25$		Terminal de Graneles $T_e/T_s = 0,50$	
	M/M/n	$E_2/E_2/n$	M/ E_2/n	$E_2/E_2/n$
1	20	41	41	55
2	45	62	64	73
3	57	71	73	81
4	65	77	78	84
5	70	80	82	87
6 o más	73	82	84	89

Fuente: Fundación Valenciaport a partir de datos de UNCTAD (1984), Agerschou (2004) y Aguilar y Obrer-Marco (2008)

Tabla 16. Recomendaciones para la tasa de ocupación admisible (Φ) en función del número de atraques y del sistema para terminales de contenedores ($T_s/T_s=0,05$; $T_s/T_s=0,10$ y $T_s/T_s=0,20$)

Nº de atraques (n)	Tasa de ocupación admisible Φ (%)											
	$T_s/T_s = 0,05$				$T_s/T_s = 0,10$				$T_s/T_s = 0,20$			
	$M/E_3/n$	$M/E_4/n$	$E_2/E_4/n$	$M/E_2/n$	$M/E_4/n$	$E_2/E_4/n$	$M/E_2/n$	$M/E_4/n$	$E_2/E_4/n$	$M/E_2/n$	$M/E_4/n$	$E_2/E_4/n$
1	<5	7	22	12	14	31	21	24	24	24	43	
2	25	27	43	33	36	53	47	49	49	49	63	
3	38	39	53	49	49	63	60	61	61	61	72	
4	47	47	61	56	57	70	66	68	68	68	78	
5	53	54	66	62	63	73	71	73	73	73	81	
6 o más	57	58	69	66	67	77	74	76	76	76	84	

Fuente: Fundación Valenciaport a partir de datos de UNCTAD (1984), Agerschou (2004) y Aguilar y Obrer-Marco (2008)

Con estas recomendaciones sobre la tasa de ocupación admisible en función de la tipología del muelle o terminal, y la formulación de la capacidad de la línea de atraque anteriormente mencionada se podrá calcular la capacidad anual de cualquier terminal o instalación.

5.3.2.3. Recomendaciones sobre productividad y nivel de servicio: evolución

Pese a que las referencias a valores de productividad son relativamente abundantes en la literatura sobre la materia, las relativas a una ordenación de los niveles de servicio son muy escasas. Ambas categorías de medición, productividad y nivel de servicio, se disponen, por ejemplo:

- en la literatura que aborda el tema del clausulado de los contratos de concesiones al tratar la necesidad de garantizar la calidad de los servicios prestados por el operador (UNCTAD, 1998; Kent y Ashar, 2010);
- en los análisis comparativos entre puertos (Marconsult, 2000; Productivity Comission, 2003; Doerr y Sánchez, 2006; Stenvert y Penfold, 2007; Drewry, 2009, etc.);
- a la hora de estimar la capacidad de los puertos por áreas geográficas o de los operadores globales (Marconsult, 2000; OSC, 2006; Drewry, 2009, etc.).

Por ejemplo, la UNCTAD (1998) aporta una serie de indicadores de rendimiento a incorporar en los contratos de concesión en el caso de las terminales de contenedores (Tabla 17). En ella, si bien los valores han quedado obsoletos, es interesante la reflexión sobre su necesaria mejora, en distintos horizontes temporales, a lo largo de la duración del contrato.

Tabla 17. Ejemplos de valores de indicadores de rendimiento para un contrato de terminal de contenedores

Indicador	< 2 años	3 - 8 años	>9 años
Tráfico mínimo	350.000 TEUs	400.000 TEUs	500.000 TEUs
	350.000 cont.	360.000 cont.	420.000 cont.
Movimientos por buque en 24 horas de atraque	500	750	1.000
Nº TEUs anuales por metro de atraque	300	400	500
Tasa máxima de ocupación (%)	45	45	50
Tiempo (h) de rotación del buque (T_p)	24	20	18

Fuente: UNCTAD (1998)

Kent y Ashar (2010) aportan otro conjunto de indicadores de productividad con sus valores (Tabla 18) e introducen dos novedades respecto a la anterior:

- Valores para los indicadores de las operaciones de recepción y entrega; y,
- Una definición de niveles de servicio, tanto para el subsistema de carga y descarga de buques como para el de recepción y entrega.

Tabla 18. Recomendaciones sobre productividad y niveles de servicio

Indicador	Subdivisión	Unidad	Nivel de servicio		
			Óptimo	Aceptable	Inaceptable
Productividad					
Productividad neta de buque en atraque (tiempo neto de atraque)	>1.000 mov/escala	mov/hora	>80	60-80	<60
	500-1.000 mov/escala	mov/hora	>50	35-50	<35
	<500 mov/escala	mov/hora	>25	20-25	<20
Productividad neta de grúa (tiempo neto)	Pórtico	mov/hora	>30	25-30	<25
	Móvil	mov/hora	>25	20-25	<20
	Buque	mov/hora	>15	10-15	<10
Productividad muelle	Anual	TEU/m	>1.250	750-1.250	<750
Tiempos de espera					
Espera Buque	Contenedores	hora	<2	2-4	>4
	Graneles	hora	<4	4-12	>12
Cola R/E camiones	Contenedores	hora	<0,5	0,5-1	>1
	Graneles	hora	<2	2-4	>4
R/E en terminal	Contenedores	hora	<0,5	0,5-1	>1
	Graneles	hora	<2	1-2	>2

NOTA: la nomenclatura es la empleada en el Manual; los valores son los originales.

Fuente: Fundación Valenciaport adaptado de Kent y Ashar (2010)

5.3.2.4. Particularización para las terminales de contenedores

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores y el estudio de Drewry (2002 y 2010), donde se hace una propuesta sobre el valor de la capacidad por línea de atraque de las terminales de contenedores en función del tipo de tráfico y del tamaño de las mismas (ver Tabla 19), se profundiza metodológicamente en la estimación de la capacidad anual por metro de línea de atraque planteando unos rangos de valores en función del tipo de tráfico, de la productividad de buque atracado y del número de puestos de atraque (véase Tabla 20).

Tabla 19. Capacidad de terminales de contenedores por línea de atraque en función del tamaño de la terminal y de la caracterización del tráfico

CAPACIDAD (TEU por metro de línea de atraque y por año)			
Escalas muy programadas. Terminal dedicada. Trasbordo >50%.	1.300	1.600	1.700
Terminal pública. O/D terrestre > 67%. Alta tasa de ocupación de muelle.	1.000	1.200	1.500
Terminal pública. O/D terrestre > 67%. Mucha competencia.	800	1.000	1.200
Caracterización del tráfico	TAMAÑO DE LA TERMINAL		
	Pequeña > 250 m < 500 m	Mediana > 500 m < 1.000 m	Grande > 1.000 m

Fuente: Drewry (2002 y 2010)

Los referidos rangos (Tabla 20) han sido calculados para terminales con puestos de atraque de 300 metros y considerando para cada caso tres calidades de servicio asociadas a ϵ : tiempos de espera del 5%, del 10% y del 20% del tiempo de servicio. Se resalta en negrita el valor del 10% (0,1), valor central de cada casilla, como el máximo recomendado por Agerschou (2004), que está dentro del intervalo contemplado por Thoresen (2003), entre el 5% y el 20%.

Tabla 20. Capacidad anual por metro de línea de atraque en función del tipo de tráfico, de la productividad de buque atracado y del número de atraques, para atraques de 300 metros

Sistema y Caracterización del tráfico	Productividad anual media buque atracado (P) (cont./h)	CAPACIDAD POR LÍNEA DE ATRAQUE - TERMINAL CONTENEDORES (Contenedores / metro línea de atraque y año) Longitud de cada de atraque= 300 m; $t_{\text{año}} = 8.640 \text{ h}$ Espera relativa: $T_j = 0,05 - 0,10 - 0,20$					
		1	2	3	4	5	6
E ₁ /E ₂ /n Escalas muy programadas	80	595 - 710 - 990	990 - 1.220 - 1.450	1.220 - 1.450 - 1.655	1.405 - 1.610 - 1.795	1.520 - 1.680 - 1.865	1.590 - 1.770 - 1.930
	70	440 - 625 - 865	865 - 1.065 - 1.270	1.065 - 1.270 - 1.450	1.230 - 1.410 - 1.570	1.330 - 1.470 - 1.630	1.390 - 1.550 - 1.690
	60	380 - 535 - 740	740 - 915 - 1.085	915 - 1.085 - 1.240	1.050 - 1.210 - 1.345	1.140 - 1.260 - 1.400	1.190 - 1.330 - 1.450
	50	315 - 445 - 615	615 - 760 - 905	760 - 905 - 1.035	875 - 1.005 - 1.120	950 - 1.050 - 1.165	990 - 1.105 - 1.210
M/E ₁ /n Llegadas aleatorias	70	140 - 280 - 480	540 - 725 - 985	785 - 985 - 1.230	945 - 1.145 - 1.370	1.085 - 1.270 - 1.470	1.165 - 1.350 - 1.530
	60	120 - 240 - 415	465 - 620 - 845	670 - 845 - 1.050	810 - 985 - 1.175	930 - 1.085 - 1.260	1.000 - 1.155 - 1.310
	50	100 - 200 - 345	385 - 515 - 705	560 - 705 - 875	675 - 820 - 975	775 - 905 - 1.050	835 - 965 - 1.090
	40	80 - 160 - 275	310 - 415 - 560	445 - 560 - 700	540 - 655 - 780	620 - 725 - 840	665 - 770 - 875
Nº Atraques (n)	1	2	3	4	5	6	

Fuente: Fundación Valenciaport

De acuerdo con lo visto en el Apartado 5.3.2.1 sobre caracterización del tráfico, la función de distribución de llegadas a las terminales públicas es aleatoria (M), mientras que la correspondiente a terminales dedicadas en general es una distribución intermedia entre el caso de terminales con llegadas aleatorias (M) y llegadas muy programadas (E_2).

En el Anexo 3 se adjunta la tabla anterior para los casos de longitudes de atraque de 250 metros y de 350 metros así como los respectivos gráficos.

La **Productividad anual media de buque atracado**, P , resulta del cociente entre la producción anual —expresada en movimientos de contenedores— y la suma de los tiempos brutos de atraque. En tal producción anual o tráfico se contabilizan los movimientos de contenedores de O/D (origen/destino) terrestre y los transbordos (que se computan a la descarga y a la carga).

P es función del número medio de grúas empleado, de su productividad y de los tiempos muertos. Por ejemplo, una productividad anual media de buque atracado de 50 cont./h puede ser resultado de una operativa con 2 grúas a 25 cont./h (incluidos todos los tiempos muertos en el atraque), o de una media de 2,5 grúas a 20 cont./h. Procede subrayar que se trata de productividad bruta (calculada sobre la suma de los tiempos brutos de atraque), que no debe confundirse con la productividad neta que se calcula sobre la suma de los tiempos de atraque netos (véase Figura 34 del Capítulo 4) que resulta mayor al dividir la producción (tráfico) por una suma de tiempos menores.

La productividad anual media de buque atracado depende del número medio de movimientos (“contenedores”) de las escalas de forma que a mayor tamaño, la productividad alcanzable y requerida es mayor. La Tabla 21 de Stenvert y Penfold (2004), más allá de los valores recogidos, ilustra bien esta relación entre el tamaño de la escala y la productividad del atraque. Resta añadir que el potencial crecimiento del tamaño medio de las escalas con el tiempo, a medio y largo plazo, permite la mejora de la productividad de modo que P es, intrínsecamente, una variable dinámica. En el Anexo 4 se profundiza en el concepto de productividad anual media de buque atracado (P).

Tabla 21. Relación entre tamaño de escala y productividad

Tamaño buque (TEUs)	Tamaño escala (mov)	Productividad atraque (mov/h)	Productividad grúa (mov/h)	Nº medio de grúas
4.400	1.067	44	22	2
5.200	1.261	53	22	2,4
6.200	1.503	63	22	2,8
6.200	2.104	88	26	3,4
8.800	2.987	124	30	4,2

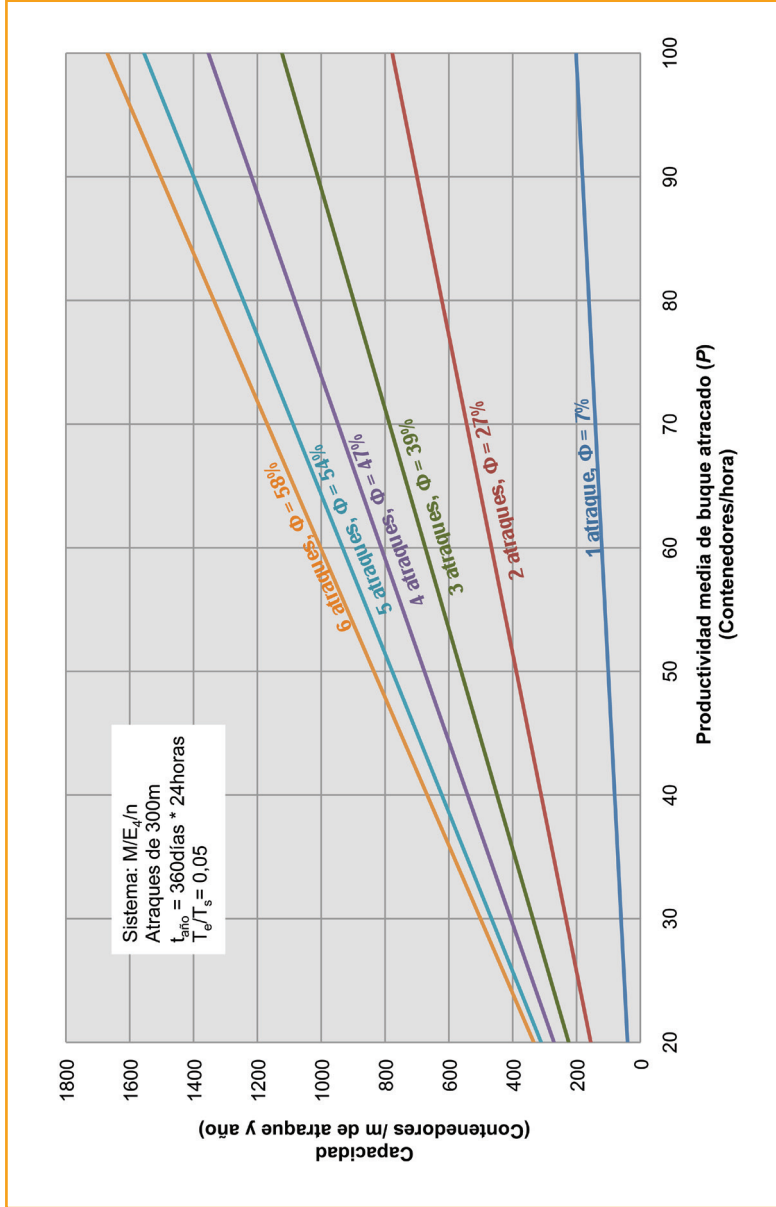
Fuente: Stenvert y Penfold (2004)

En los Gráficos 6 y 7 se representan las capacidades anuales, en número de contenedores por metro de línea de atraque, en función de la productividad de buque atracado y del número de atraques (atraques de 300 metros cada uno), para el caso de una espera relativa de 0,10, y terminales con sistemas $M/E_4/n$ y $E_2/E_4/n$, respectivamente.

Como ocurre en todo el capítulo, para el cálculo se ha considerado que el tiempo operativo de la terminal al año (t_{ano}) son 24 horas de 360 días.

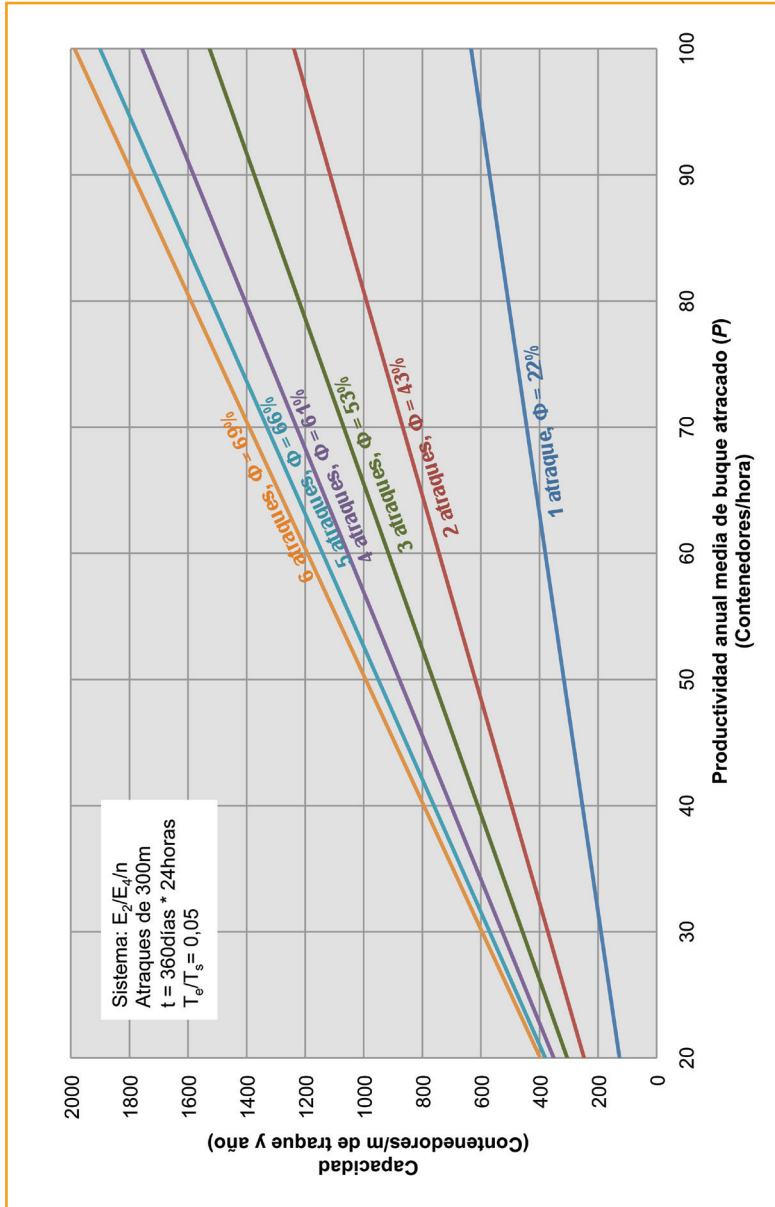
En los Gráficos 4 y 5 se hace lo mismo pero con una espera relativa de 0,05, y en los Gráficos 8 y 9 para una espera relativa de 0,20.

Gráfico 4. Capacidad anual por línea de atraque de un sistema $M/E_4/n$ y espera relativa de 0,05 para atraques de 300 m



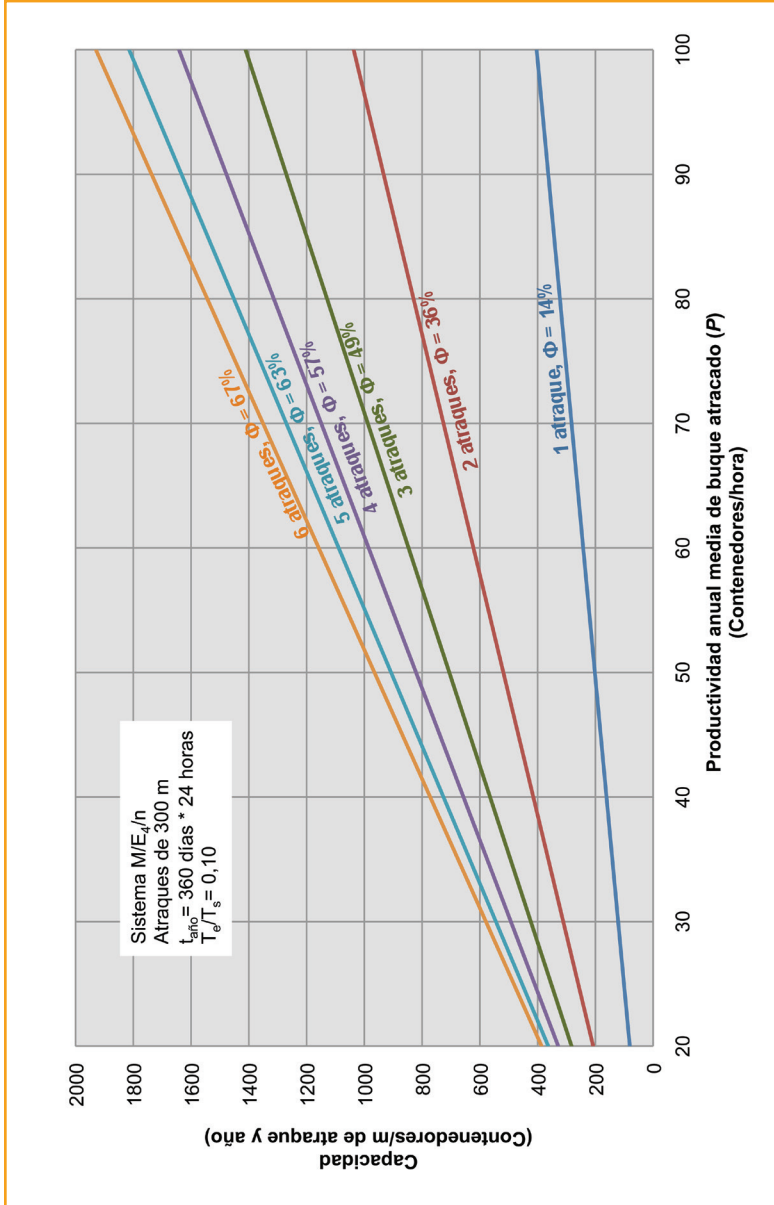
Fuente: Fundación Valenciaport

Gráfico 5. Capacidad anual por línea de atraque de un sistema $E_2/E_1/n$ y espera relativa de 0,05 para atraques de 300 m



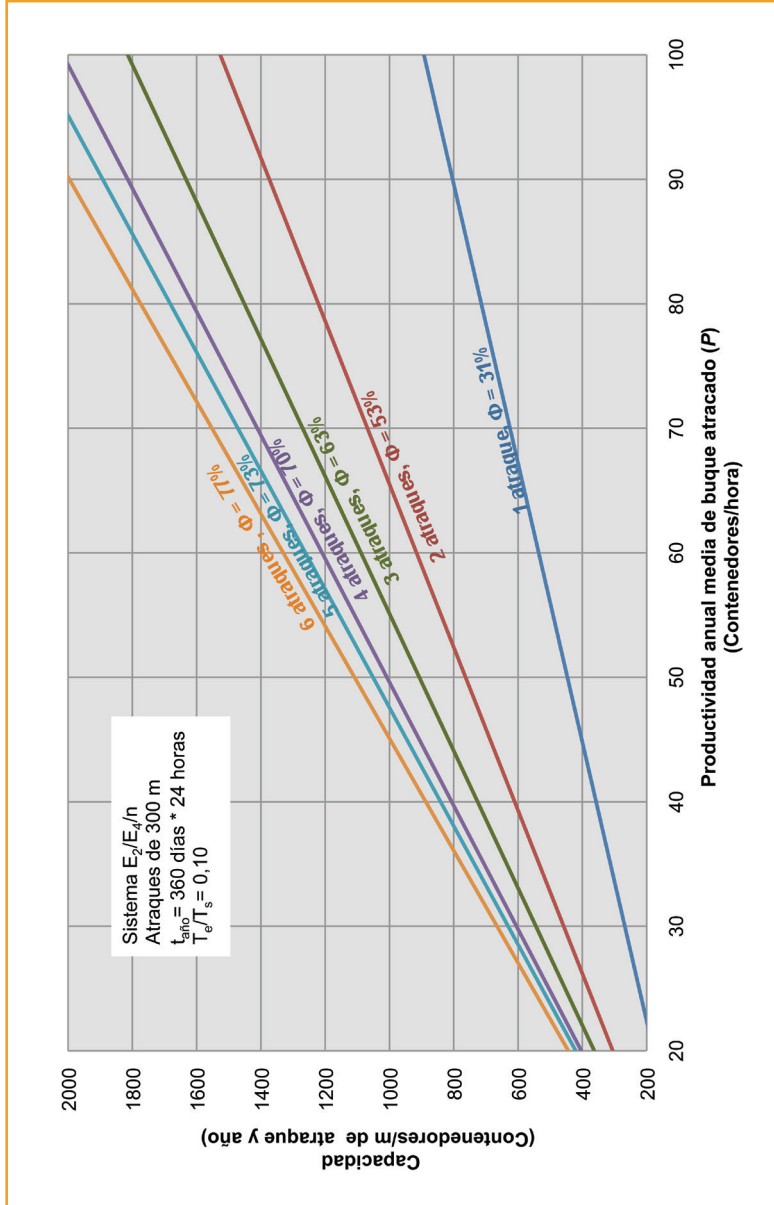
Fuente: Fundación Valenciaport

Gráfico 6. Capacidad anual por línea de atraque de un sistema $M/E_4/n$ y espera relativa de 0,1 para atraques de 300 m



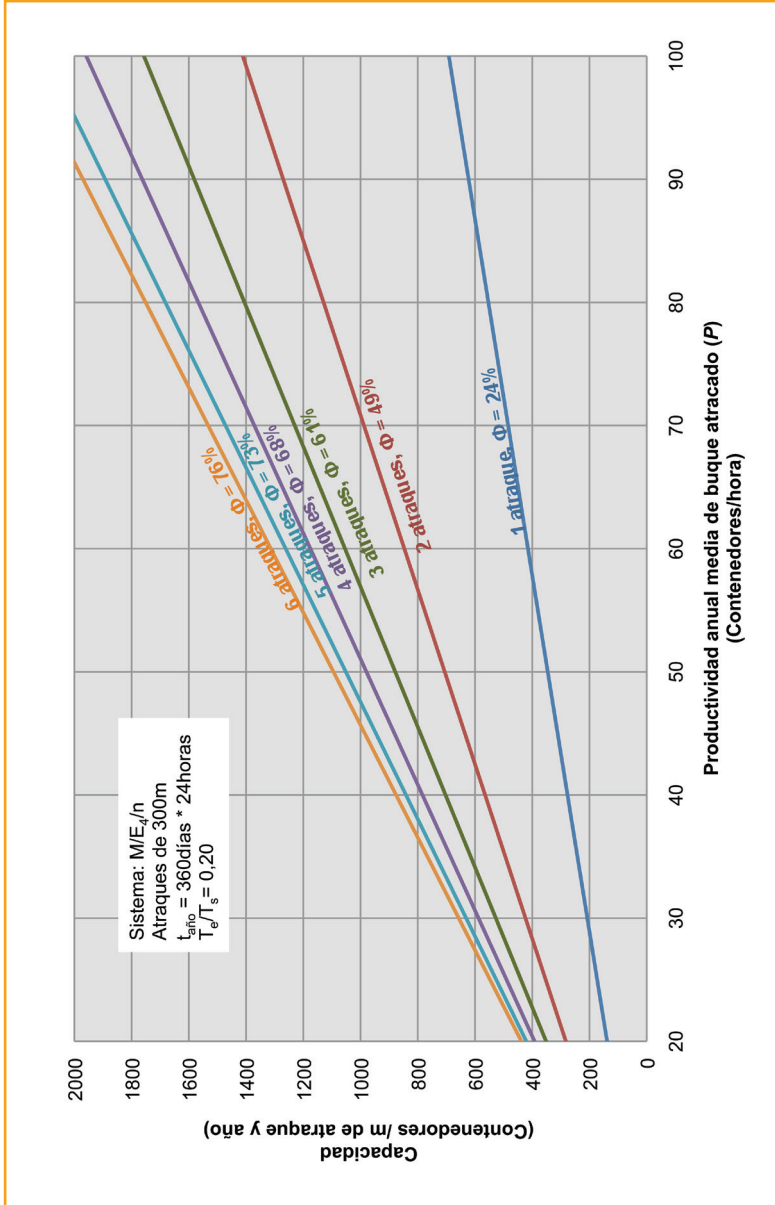
Fuente: Fundación Valenciaport

Gráfico 7. Capacidad anual por línea de atraque de un sistema $E_2/E_4/n$ y espera relativa de 0,1 para atraques de 300 m



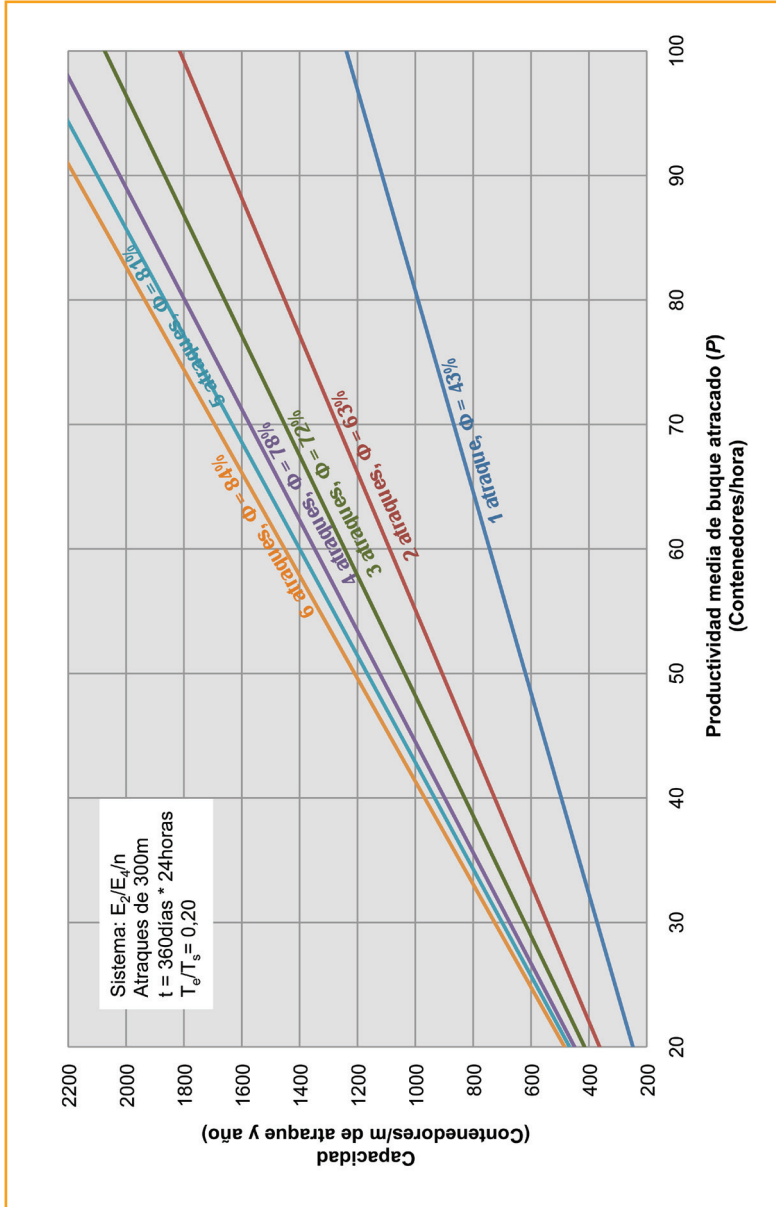
Fuente: Fundación Valenciaport

Gráfico 8. Capacidad anual por línea de atraque de un sistema $M/E_4/n$ y espera relativa de 0,2 para atraques de 300 m



Fuente: Fundación Valenciaport

Gráfico 9. Capacidad anual por línea de atraque de un sistema $E_2/E_1/n$ y espera relativa de 0,2 para atraques de 300 m



Fuente: Fundación Valenciaport

Hay que mencionar que los valores de capacidad por metro de línea de atraque y de productividad de buque atracado, reflejados tanto en la Tabla 20 como en los gráficos anteriores, están expresados en contenedores/hora. Por lo tanto, para determinar la capacidad de atraque en TEUs por metro de atraque es necesario aplicar un factor de conversión de TEUs/contenedor. Suponiendo una proporción del 50% de contenedores de 40', este factor sería del 1,5. Sin embargo, en algunos puertos el porcentaje de contenedores de 40' es mayor, lo que implica un ratio más alto.

De acuerdo con el Gráfico 6 y la Tabla 20 se puede observar que, por ejemplo, la terminal con un sistema $M/E_4/n$ ($T_e/T_s=0,10$) de 3 atraques tiene un 36% más de capacidad, por cada atraque, que una de 2 atraques, y que las terminales de 4, 5 y 6 atraques tienen respectivamente un 58%, 75% y 86%, más de capacidad, por cada atraque, que una terminal de 2 atraques. Es decir, **el número de atraques influye de manera no proporcional en la capacidad de la línea de atraque de la terminal.**

Por otro lado, cuando se disminuye la espera relativa (T_e/T_s) de una terminal de 3 o más atraques en un 100% por ejemplo (pasando de 0,1 a 0,2, duplicando el tiempo de espera del buque para el mismo tiempo de servicio), el incremento de capacidad que se obtiene es inferior al 25%.

5.3.2.5. Propuesta de niveles de servicio

Como avance sobre la bibliografía actual se realiza la siguiente propuesta de niveles de servicio para el **subsistema de carga y descarga de buques o de línea de atraque** (véase Tabla 22), asociados a la calidad percibida por la naviera de línea de atraque en términos de espera relativa (T_e/T_s) y de productividad anual media de buque atracado (P).

Tabla 22. Propuesta de niveles de servicio para el subsistema de carga y descarga de buques o de línea de atraque

Nivel de servicio	Espera relativa	NIVELES DE SERVICIO			
D	> 0,20	-	-	-	-
C	0,10 - 0,20	-	CC	BC	AC
B	0,05 - 0,10	-	CB	BB	AB
A	hasta 0,05	-	CA	BA	AA
		< 35	35-50	50-65	> 65
		Productividad anual media de buque atracado (P) (cont./h)			
		D	C	B	A
		Nivel de servicio			

Fuente: Fundación Valenciaport

La propuesta produce 9 niveles de servicio (AA, AB, ..., CC) y se relaciona con la dimensión de la capacidad por línea de atraque (expresada en contenedores por metro lineal de atraque y año), a través de los gráficos que expresan la relación de ésta con la productividad anual media de buque atracado (P) para distintos niveles de espera relativa, de modo que puede grafarse en tales dimensiones.

En las Tablas 23 y 24 se representan los niveles de servicio en las dos dimensiones y en términos de capacidad por línea de atraque (en contenedores y TEUs por metro de línea de atraque respectivamente) para el caso $M/E_4/2$. Cabe señalar que se ha considerado como nivel mínimo aceptable (CC) una productividad anual media de buque atracado (P) de 35 movimientos/hora (O/D terrestre más transbordo) que con una espera relativa de 0,2 supone una capacidad por metro de atraque y año de 494 contenedores, equivalente a 741 TEUs para la relación 1,5 TEUs/cont. En el Gráfico 10 se expresa el referido caso incorporando adicionalmente algunos niveles de servicio para muelles de 3 atraques.

Tabla 23. Niveles de servicio para el caso $M/E_{i/2}$ y atraque de 300 m
(Productividad por línea de atraque en contenedores/metro)

Nivel de servicio	Espera relativa	NIVELES DE SERVICIO (Sistema $M/E_{i/2}$) Atraque de 300 m			
		Productividad por línea de atraque (cont./m)			
D	> 0,20	-	-	-	-
C	0,20	-	494-706	706-917	> 917
B	0,10	-	363-518	518-674	> 674
A	0,05	-	272-389	389-505	> 505
		< 35	35-50	50-65	> 65
Productividad anual media de buque atracado (P) (cont./h)					
		D	C	B	A
Nivel de servicio					

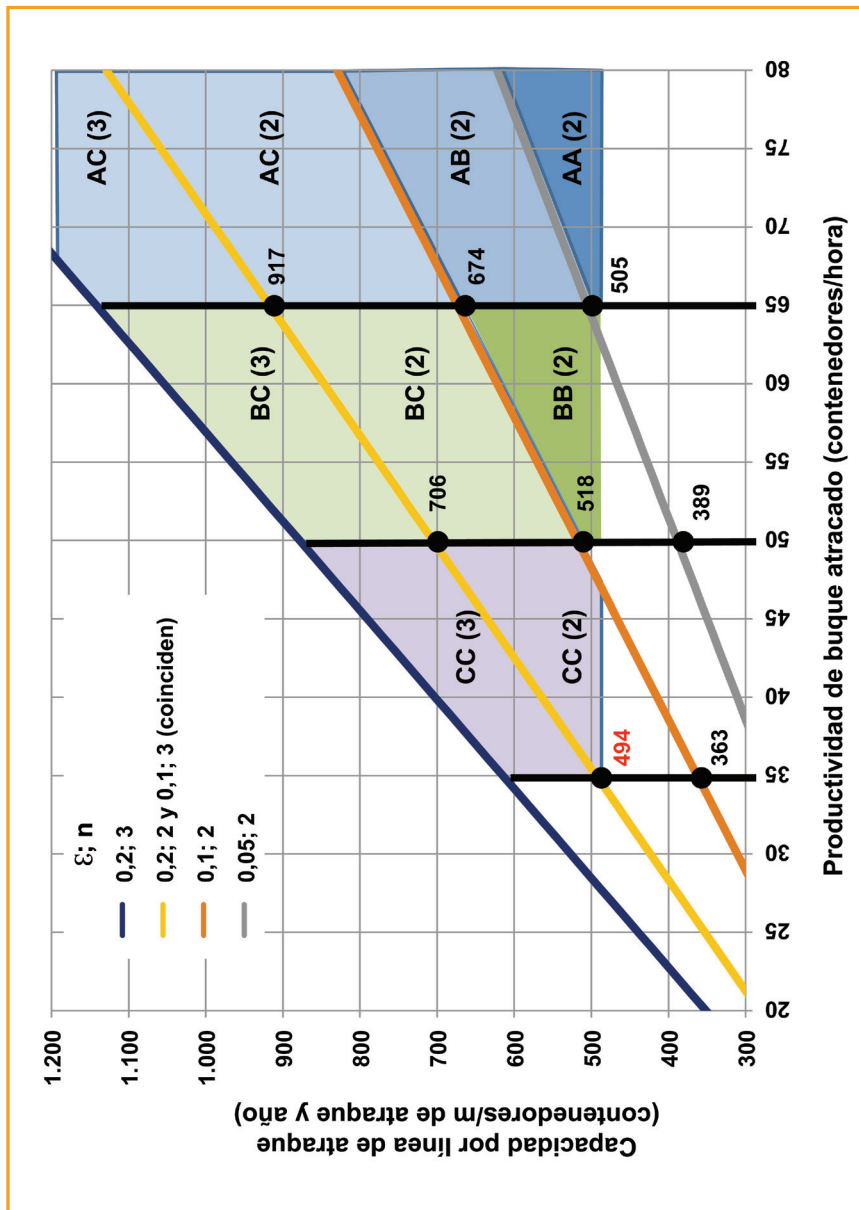
Fuente: Fundación Valenciaport

Tabla 24. Niveles de servicio para el caso $M/E_{i/2}$ y atraque de 300 m
(Productividad por línea de atraque en TEUs/metro)

Nivel de servicio	Espera relativa	NIVELES DE SERVICIO (Sistema $M/E_{i/2}$) Atraque de 300 m			
		Productividad por línea de atraque (TEUs/m)			
D	> 0,20	-	-	-	-
C	0,20	-	741-1.058	1.058-1.376	> 1.376
B	0,10	-	544-778	778-1.011	> 1.011
A	0,05	-	408-583	583-758	> 758
	1 cont.= 1,5 TEUs	< 35	35-50	50-65	> 65
Productividad anual media de buque atracado (P) (cont./h)					
		D	C	B	A
Nivel de servicio					

Fuente: Fundación Valenciaport

Gráfico 10. Niveles de servicio para el caso $M/E_4/n$ para $n=2$ y $n=3$ con atraques de 300 m



Fuente: Fundación Valenciaport

5.4. Capacidad de almacenamiento

En este apartado se estudia cómo calcular la capacidad de almacenamiento o por superficie de las terminales portuarias, desde el punto de vista de la planificación y la gestión. En este sentido se pueden plantear dos cuestiones:

- Dado un tráfico, qué superficie se necesita para atenderlo; y,
- Dada una superficie, qué tráfico máximo se puede atender.

La capacidad por superficie o del subsistema de almacenamiento depende de los siguientes factores:

- La forma de presentación de las mercancías;
- La densidad superficial y productividad del sistema de almacenamiento;
- La altura de apilado;
- Los tiempos de estancia de las mercancías en la terminal (rotación);
- La estacionalidad (picos y valles) del tráfico;
- La forma y dimensión en planta de la terminal; y
- La gestión del patio (en particular, el nivel de desarrollo del TOS).

5.4.1. Definición

La fórmula genérica de la capacidad por superficie es (ROM 2.1 – González-Herrero et al., 2006):

$$C_{Pi} = \frac{A_i \times h_i \times 365 \times g_o \times \alpha_o}{T_a \times s_i}$$

Donde,

- C_{Pi} : Capacidad anual de almacenamiento correspondiente al tipo de tráfico i (toneladas, contenedores o TEUs, unidades por año). A estos efectos los tráfcos de transbordo se computarán sólo una vez.
- A_i : Área o superficie de almacenamiento correspondiente al tipo de tráfico i (en m^2 o ha).
- h_i : Factor de apilamiento, definiéndose como el cociente entre la altura operativa media de apilado y la máxima alcanzable, correspondiente al tipo de tráfico i . El incremento de este factor supone un mayor número de remociones de la mercancía o de los elementos de transporte almacenados.

- g_o : Factor de ocupación, o factor punta, que permite considerar la distribución no uniforme de las llegadas y salidas de las mercancías a lo largo del año, así como la frecuencia aceptable de saturación del área. A falta de otros datos, puede adoptarse un valor de 0,80.
- α_o : Coeficiente de almacenamiento neto, definiéndose como el porcentaje del área de almacenamiento y servicios auxiliares destinada al depósito de las mercancías, incluyendo los viales internos, respecto del total.
- T_o : Tiempo medio de tránsito o estancia de la mercancía en el área de almacenamiento (en días). Este factor es muy variable, dependiendo del tipo de tráfico, de si se utiliza el área portuaria como depósito temporal a corto plazo o como reserva estratégica, y de las condiciones locales del emplazamiento.
- s_i : Superficie unitaria bruta requerida (en m^2 o ha) por el tipo de tráfico i por tonelada, contenedor, TEU o unidad, considerando el área de almacenamiento neto (incluyendo viales internos). Este parámetro es función del tipo de mercancía o elemento de transporte, de la operativa y de los equipos de manipulación empleados en el área de almacenamiento, de la configuración y organización del área, así como de la densidad y de la máxima altura de apilamiento. A falta de otros datos se pueden tomar como referencia los siguientes valores:
- Tráficos Ro-Ro: 20 m^2/Ud si se trata de automóviles y 120 m^2/Ud en el caso de camiones y plataformas.
 - Mercancía general no contenedorizada y graneles sólidos: este valor puede obtenerse a partir de la configuración del apilamiento y de las máximas alturas de almacenamiento usuales incluidas en la ROM 0.2-90 (Comisión técnica de la ROM 0.2, 1990).
 - Contenedores: considerar las fórmulas y especificaciones que aparecen en el apartado siguiente.

5.4.2. Particularización para las terminales de contenedores

En este apartado se hace una particularización del cálculo de la capacidad de almacenamiento para las terminales de contenedores. En primer lugar, se definen algunos de los conceptos utilizados; seguidamente se plantea la formulación del cálculo de la capacidad de almacenamiento de las terminales de contenedores, así como los factores que influyen en la misma; y, finalmente se incluyen recomendaciones sobre la capacidad por superficie para dichas terminales.

5.4.2.1. Conceptos

A continuación se definen algunos conceptos utilizados en el presente apartado con el objetivo de sentar las bases para el cálculo de capacidad:

Área de la terminal (A_T) (m^2 o ha): Área total de la terminal delimitada por sus vallas.

Área de almacenamiento o de patio (A_p) (m^2 o ha): Área de la terminal destinada a almacenar los contenedores. Incluye toda el área utilizada para la infraestructura de almacenamiento, es decir, los pasillos entre los bloques de contenedores, los raíles de los equipos, etc.

Nº Huellas_TEU o ground slot (Huellas_TEU): Número de posiciones o *slots* a nivel del suelo para un TEU que tiene la terminal. Se considera que la superficie de una Huella_TEU es de $15 m^2$.

Slot: Es cualquier posible ubicación de un contenedor en el patio teniendo en cuenta la configuración del mismo.

Área de Almacenamiento Neta (A_{PN}) (m^2 o ha): Área de la terminal destinada estrictamente a almacenar los contenedores, es decir, teniendo en cuenta solamente la superficie que ocupan las huellas, sin contabilizar los espacios ocupados por las infraestructuras de almacenamiento.

$$A_{PN} = N^{\circ} \text{ Huellas_TEU} * 15 m^2$$

Densidad superficial de la terminal (D_T) (N° Huellas_TEU/ha): Número de huellas por área de la terminal:

$$D_T = N^{\circ} \text{ Huellas_TEU} / A_T$$

Densidad superficial de almacenamiento (D_p) (N° Huellas_TEU/ha): Número de huellas por área de patio de almacenamiento:

$$D_p = N^{\circ} \text{ Huellas_TEU} / A_p$$

Tiempo de estancia (T_a) (días): Tiempo medio de estancia (*dwell time*) de los contenedores en el patio de almacenamiento de la terminal.

Número medio de rotaciones anuales: $365/T_a$

Capacidad estática de almacenamiento (C_s): Es la capacidad por superficie de la terminal de contenedores teniendo en cuenta solamente la densidad superficial (Huellas_TEU/ha) y la altura operativa media de apilado. Es el número medio de contenedores a disponer en el patio por hectárea teniendo en cuenta la configuración del mismo y una adecuada operatividad.

Capacidad anual de almacenamiento (C_p): Es la capacidad del patio de la terminal considerando, además de la densidad superficial y de la altura operativa media de apilado, la rotación (anual) de los contenedores.

5.4.2.2. Definición

En el caso específico de las terminales de contenedores, la fórmula genérica de la capacidad de almacenamiento anual es:

Donde,

$$C_p = N^{\circ} \text{ Huellas_TEU} \times h \times \frac{365}{T_a}$$

- C_p : Capacidad anual de almacenamiento de la terminal (TEUs anuales)
- h : Altura operativa media de apilado
- T_a : Tiempo de estancia medio de los contenedores en el área de almacenamiento (en días)
- $365/T_a$: N° medio de rotaciones anuales

Que expresada en términos de la altura máxima de apilado y del factor operacional queda:

Donde,

$$C_p = N^{\circ} \text{ Huellas_TEU} \times H \times \frac{365}{T_a} \times K$$

- H : Altura máxima de apilado o altura nominal del equipo
 T_a : Tiempo de estancia medio (en días)
 K : Factor operacional
 $365/T_a$: N° medio rotaciones anuales

K es el factor operacional para el sistema de almacenamiento utilizado, que minora la altura máxima, lo que es necesario para trabajar en condiciones operativas y no realizar excesivas remociones (movimientos improductivos). Cuanto mayor sea la altura de apilado, mayor será el número de contenedores a mover para alcanzar uno determinado. En función del equipo de patio, este factor varía entre 0,55 y 0,70 (Wieschemann y Rijsenbrij, 2004).

Tanto la altura como el tiempo de estancia de los contenedores pueden tener valores diferentes para los distintos tipos de tráfico. Por ejemplo:

- más altura y estancias más largas para contenedores vacíos;
- igual altura para contenedores de importación y de exportación pero diferente tiempo de estancia;
- altura menor para los contenedores de importación;
- tiempos de almacenamiento diferentes según servicio.

La formulación anterior incluye la simplificación de no diferenciar alturas operativas medias y tiempos de estancia medios atendiendo a las particularidades de la tipología de los contenedores (llenos/vacíos; importación-exportación/transbordos, reefers, etc.). Sin embargo esta fórmula puede considerar las características del tráfico, diferenciando tantas categorías como datos disponibles tenga o simule la terminal. A modo de ejemplo, considerando las diferencias entre los tráficos de contenedores llenos y vacíos, la fórmula quedaría como sigue:

$$C_p = N^{\circ} \text{Huellas_TEU} \times 365 \times \left(\% \text{ llenos} \times \frac{H_{Ll} \times K_{Ll}}{T_{Ll}} + \% \text{ vacíos} \times \frac{H_V \times K_V}{T_V} \right)$$

Donde,

- H_{Ll} : Altura nominal de apilado de los contenedores llenos

- K_L : Factor operacional para contenedores llenos
- T_L : Tiempo de estancia medio de los contenedores llenos
- H_V : Altura nominal de apilado de los contenedores vacíos
- K_V : Factor operacional para contenedores vacíos
- T_V : Tiempo de estancia medio de los contenedores vacíos

El resultado de aplicar la fórmula anterior de capacidad anual de almacenamiento, C_p , no es comparable con el resultado de la capacidad anual por línea de atraque debido al doble cómputo en esta última de los contenedores de transbordo. Para obtener la capacidad anual de almacenamiento en términos equivalentes a la que se obtiene por línea de atraque hay que realizar la transformación que sigue:

$$C_{P \text{ eq } LA} = K_{PTB} \times C_p$$

Donde,

- $C_{P \text{ eq } LA}$: Capacidad anual de almacenamiento equivalente a capacidad anual por línea de atraque
- K_{PTB} : Coeficiente de transformación de contenedores de capacidad de patio en contenedores equivalentes de capacidad de línea de atraque, que se calcula con la siguiente expresión:

$$K_{PTB} = \frac{200}{2 \times \% O/D + \% TB}$$

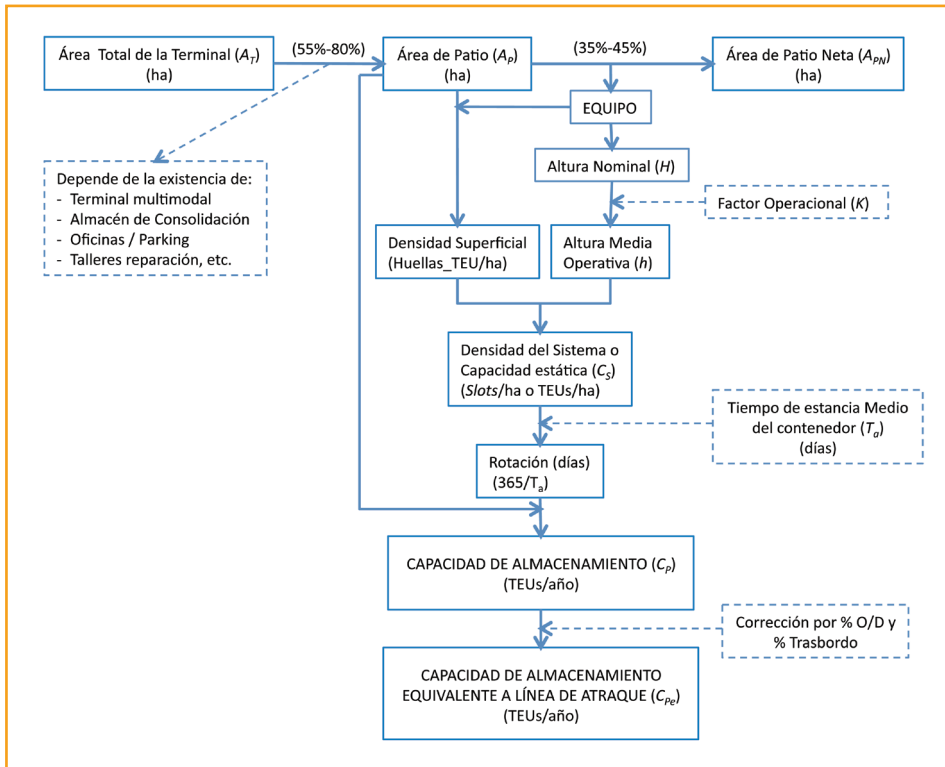
Donde,

- $\% TB$: porcentaje de tráfico de transbordo sobre el tráfico total
- $\% O/D$: porcentaje de tráfico de origen/destino terrestre sobre el tráfico de la terminal

Así, por ejemplo, si el tráfico de transbordo es nulo, K_{PTB} es 1; si es 100%, K_{PTB} es 2; y si es del 50%, K_{PTB} resulta ser 1,33.

La Figura 38 refleja esquemáticamente los elementos clave que deben tenerse en cuenta a la hora de calcular la capacidad de almacenamiento de las terminales de contenedores, así como la relación entre ellos.

Figura 38. Capacidad de almacenamiento de las terminales de contenedores



Fuente: Fundación Valenciaport

5.4.2.3. Factores que influyen en la capacidad de almacenamiento

Los principales factores que influyen en la capacidad son:

- La **densidad superficial de almacenamiento o de patio** (huellas por hectárea de patio);
- La **altura operativa media de apilado**; y,
- El **tiempo de estancia** de los contenedores en la terminal.

Densidad superficial: huellas_TEU por superficie

El área total de la terminal portuaria incluye el área de almacenamiento, la zona de operaciones del muelle, oficinas, almacenes y talleres de maquinaria, las zonas de aparcamiento y otras áreas que pueden existir o no en función de la actividad de la terminal, como el almacén de consolidación y desconsolidación, el taller para reparación de contenedores, la terminal multimodal (véase Figura 22 del Capítulo 2), etc. Como se ha definido anteriormente y según algunos autores, el área de almacenamiento (marcada en naranja en dicha figura) es la parte de la terminal destinada a almacenar los contenedores que, tal y como ya se ha definido, incluye los viales y los pasillos entre bloques (Germanischer Lloyd Certification, 2008; Wieschemann y Rijsenbrij, 2004; Kuznetsov, 2008).

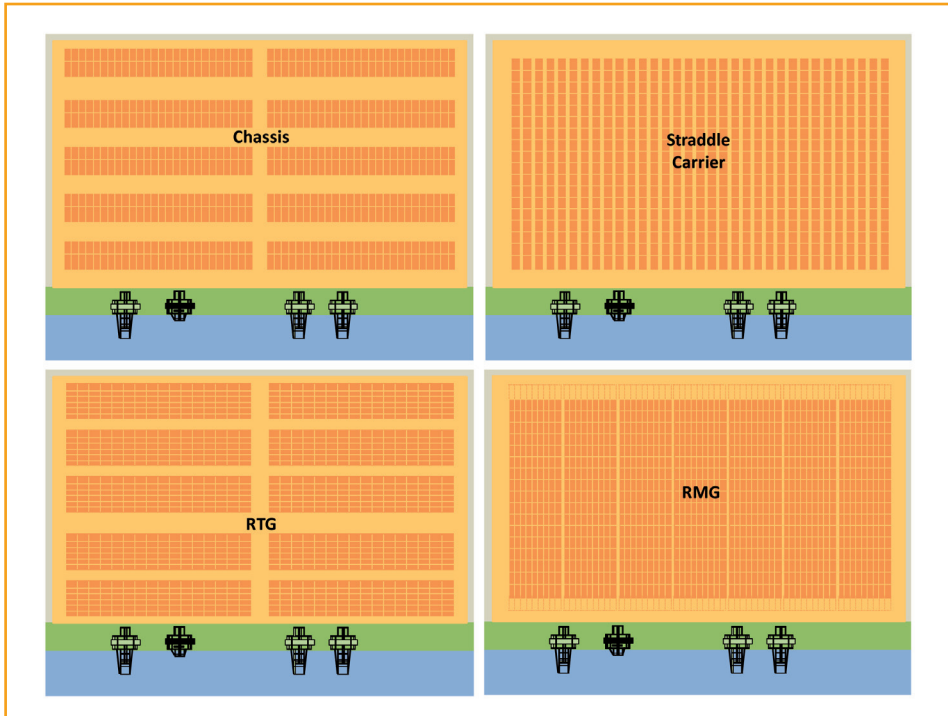
La densidad superficial resulta del cociente entre el número de huellas_TEU y el área de patio. Para cada sistema de almacenamiento –plataformas, *reachstacker*, *straddle carrier*, RTG, RMG, etc.–, la densidad por superficie, medida en Huellas_TEU/m² o Huellas_TEU/ha, es función de la distribución de las huellas, pasillos y viales, de la geometría del patio de la terminal (véase ejemplos en la Figura 39) y de la distribución del patio. La densidad superficial, si se expresa en términos del porcentaje de aprovechamiento del recuso “superficie de almacenamiento”, es una medición de utilización de tal recurso.

En la gestión del patio, generalmente, se definen distintas zonas para los contenedores de importación, exportación, vacíos; otras áreas para contenedores frigoríficos; para carga y descarga del ferrocarril; o para contenedores especiales (mercancías peligrosas, sobredimensionados, etc.). Siguiendo criterios de seguridad, la mercancía peligrosa puede estar repartida por toda la terminal o almacenada en zonas especiales para este tipo de carga, dependiendo de su naturaleza.

Además de estos criterios de distribución, las terminales pueden tener en cuenta tantos factores como sea conveniente para mejorar la organización del patio. Por ejemplo, las grandes terminales, en cada una de dichas áreas pueden reservar espacio para los clientes principales (en función de los servicios –líneas–, puertos de destino, etc.).

En general, los referidos condicionantes derivados de la distribución del patio reducen la densidad superficial y por tanto, la capacidad del subsistema de almacenamiento de la terminal.

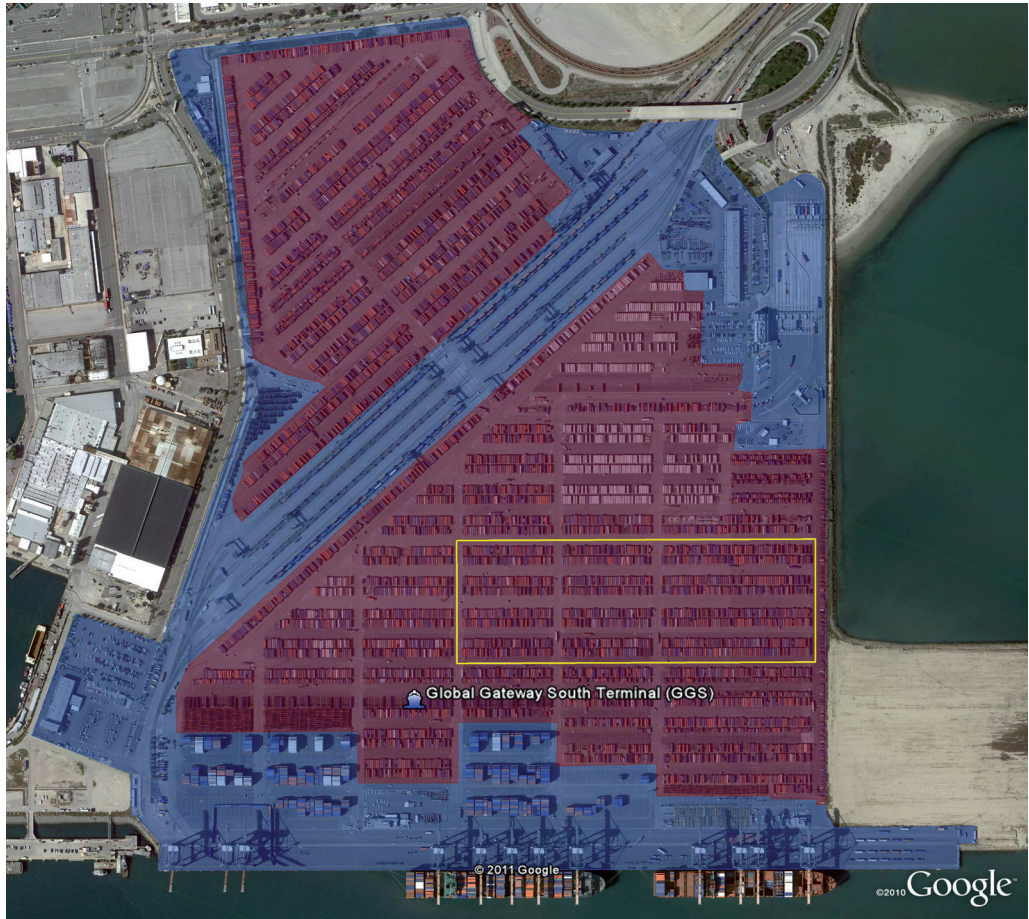
Figura 39. Distintas configuraciones del área de almacenamiento según la tipología de la terminal



Fuente: Fundación Valenciaport

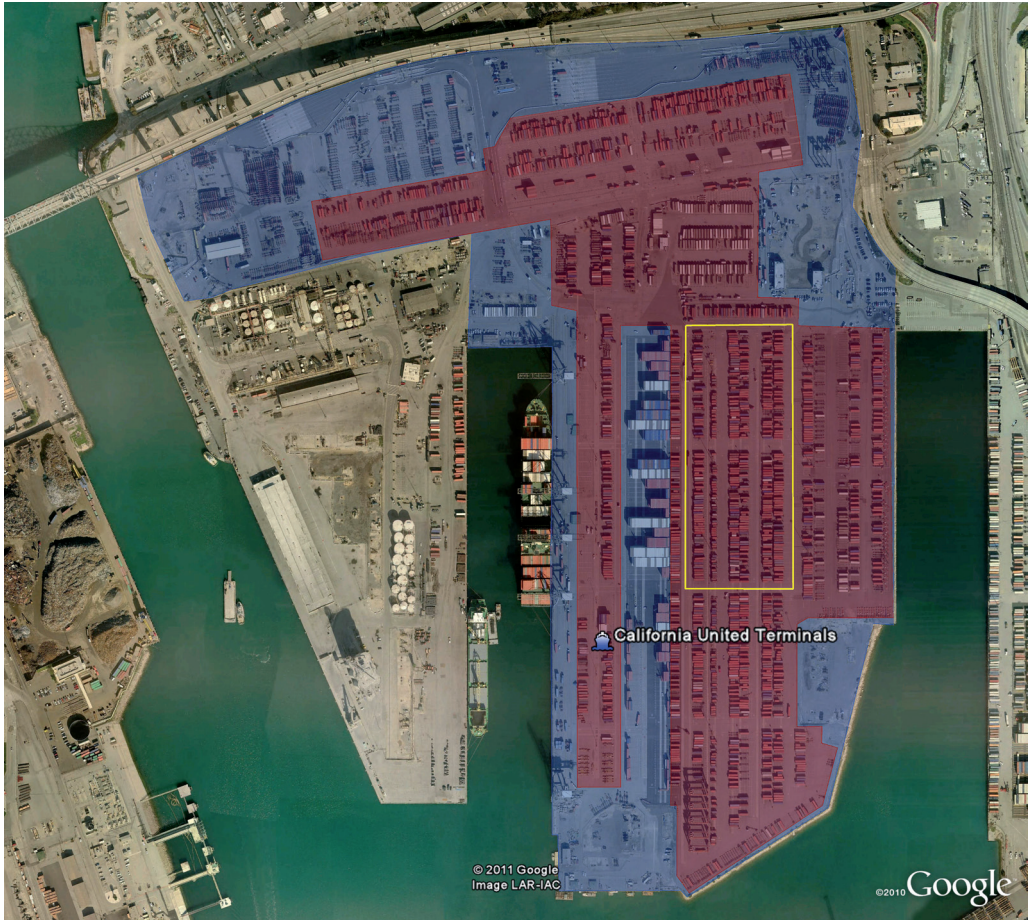
A continuación se presenta el cálculo de las densidades superficiales (huellas_TEU/ha) de varias terminales de contenedores a nivel internacional. A tal fin se presentan las fotos aéreas de estas instalaciones con sus respectivas áreas totales (señaladas en azul) y de almacenamiento reservadas al equipo de patio que caracteriza a la terminal (señaladas en rojo) –ver Figura 40–. A partir de estas fotos y de los datos proporcionados por las propias terminales (y, en su defecto, los encontrados en las páginas webs de las mismas), se han calculado las densidades superficiales de las áreas de almacenamiento, teniendo en cuenta el equipo de patio utilizado en cada caso.

Figura 40. Área de patio de plataformas en Global Gateway South (Los Ángeles - EE.UU.)



Fuente: © 2011 Google

Figura 41. Área de patio de plataformas en California United Terminals (Long Beach - EE.UU.)



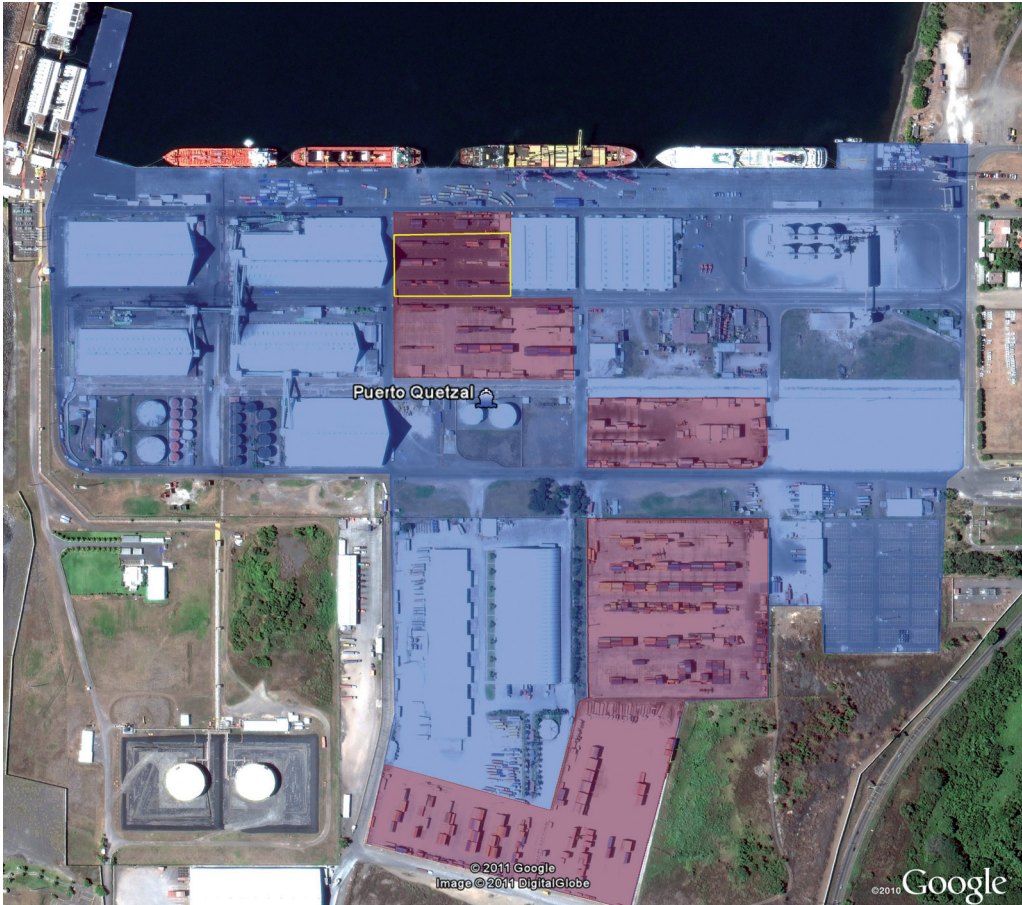
Fuente: © 2011 Google. Image LAR-IAC

Figura 42. Área de patio de *reachstackers* en Terminal P. Castellón (Castellón - España)



Fuente: © 2010 Google. © 2011 Tele Atlas

Figura 43. Área de patio de *reachstackers* en Puerto Quetzal (San José - Guatemala)



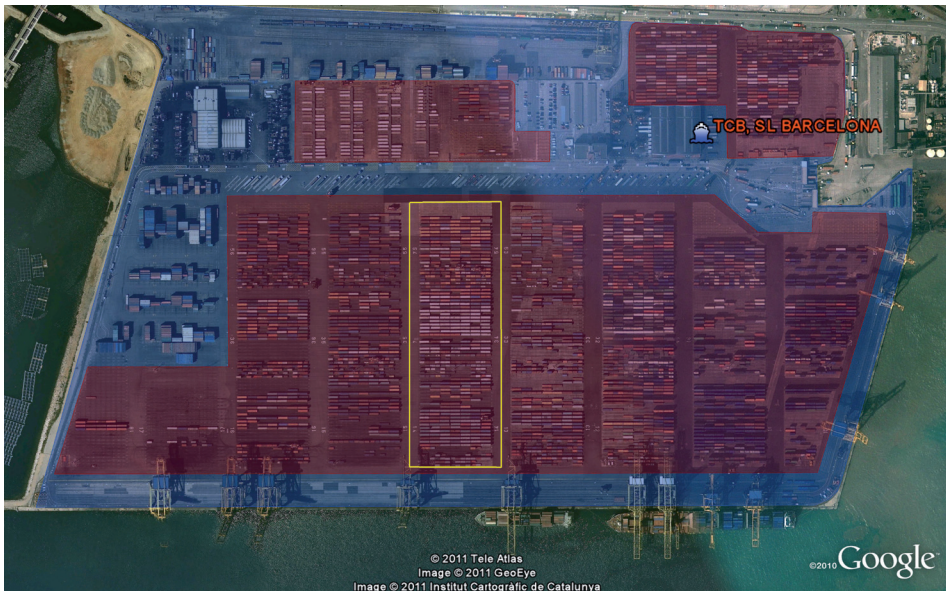
Fuente: © 2011 Google. Image © 2011 DigitalGlobe

Figura 44. Área de patio de *reachstackers* en San Antonio Terminal Internacional (San Antonio - Chile)



Fuente: © 2011 Google. Image © 2011 GeoEye. © Inav/Geosistemas SRL

Figura 45. Área de patio de *Straddle carriers* en TCB. (Barcelona - España)



Fuente: © 2010 Google. © 2011 Tele Atlas. Image © 2011 GeoEye. Image © 2011 Institut Cartogràfic de Catalunya

Figura 46. Área de patio de *Straddle carriers* en Eurogate Container Terminal (Hamburgo - Alemania)



Fuente: © Google. Image © 2011 AeroWest

Figura 47. Área de patio de RTGs (6+1) en Noatum Container Terminal Valencia (Valencia - España)



Fuente: © 2010 Google. © 2011 Tele Atlas

Figura 48. Área de patio de RTGs (6+1) en MSC Terminal Valencia (Valencia - España)



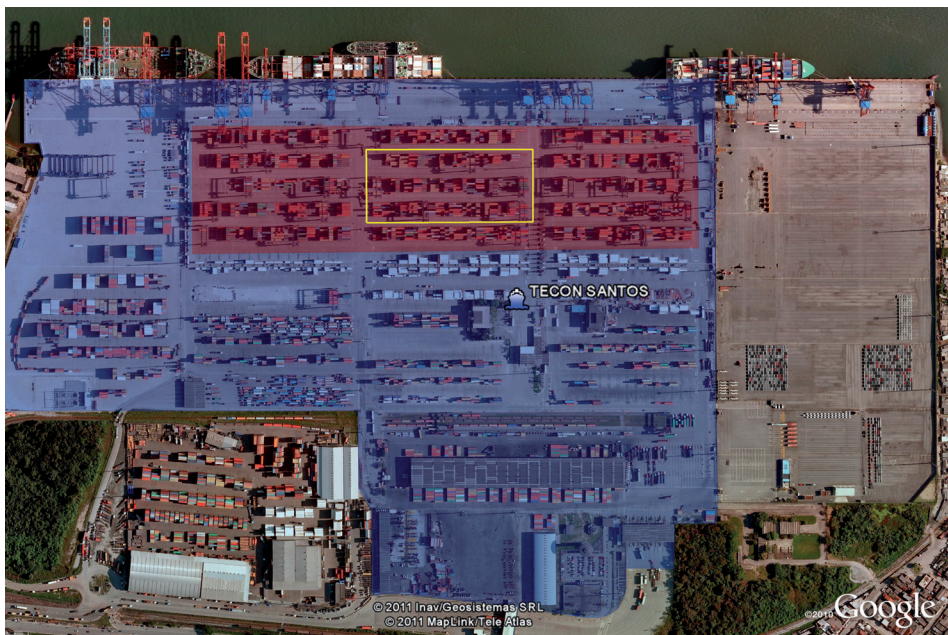
Fuente: © 2010 Google. © 2011 DigitalGlobe. © 2011 Tele Atlas

Figura 49. Área de patio de RTGs (6+1) en Terminal Darsena Toscana (Livorno - Italia)



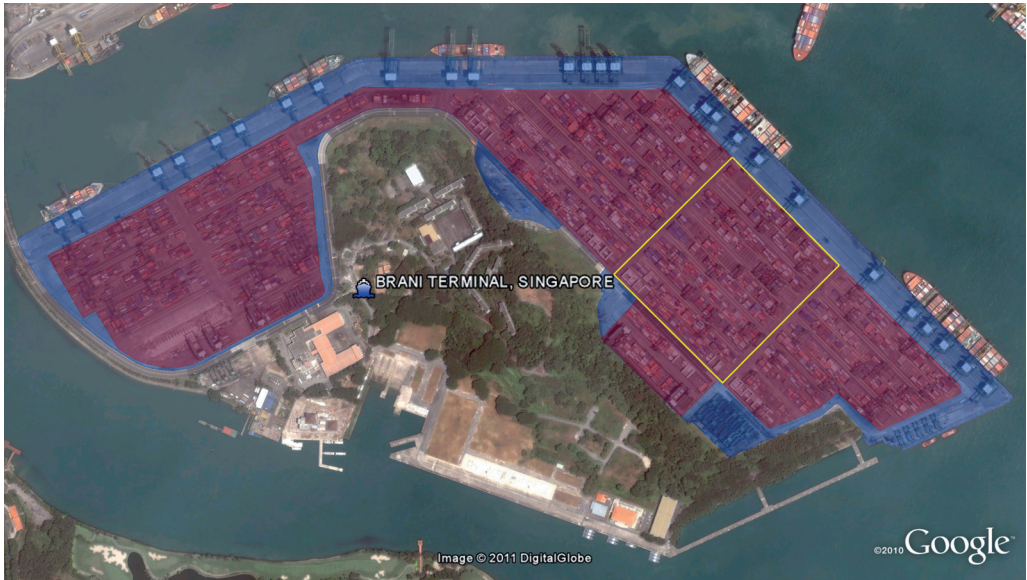
Fuente: © 2010 Google. © 2011 GeoEye

Figura 50. Área de patio de RTGs (7+1) en TECON Santos (Santos - Brasil)



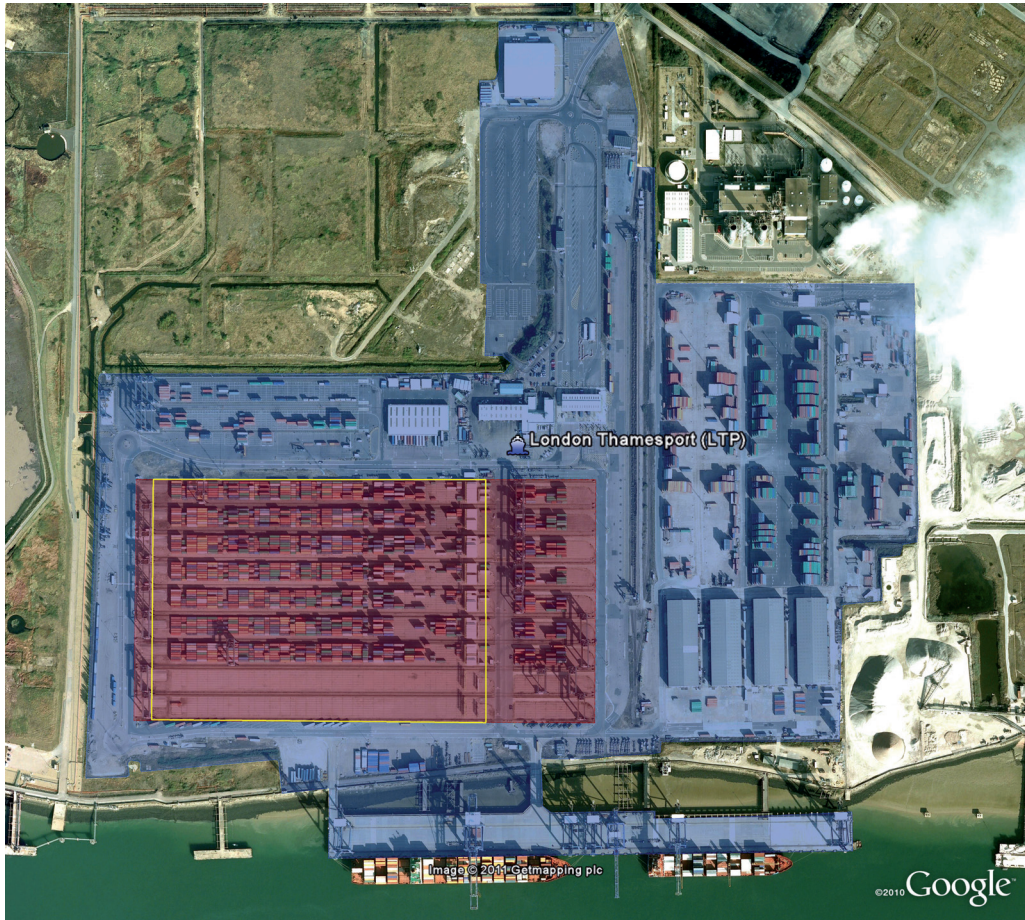
Fuente: © 2010 Google. © 2011 Inav/Geosistemas SRL. © 2011 MapLink/Tele Atlas

Figura 51. Área de patio de RTGs (8+1) en Brani Terminal (Brani - Singapur)



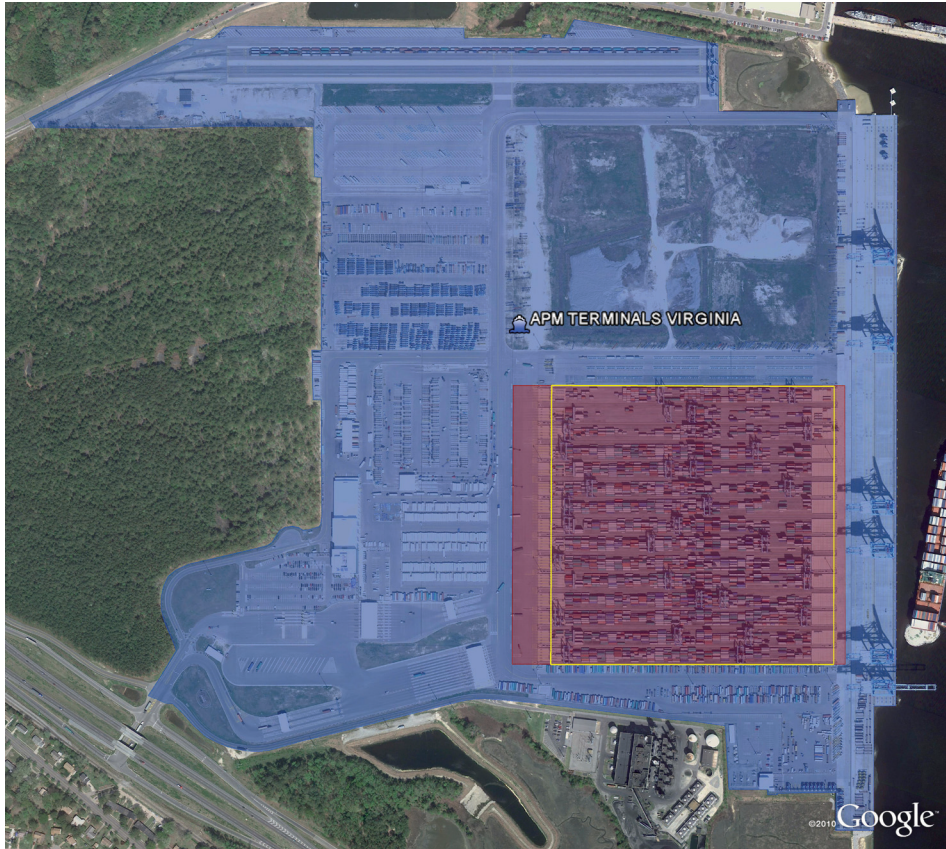
Fuente: © 2010 Google. Image © 2011 DigitalGlobe

Figura 52. Área de patio de RMGs (g) en London Thamesport (Londres - Reino Unido)



Fuente: © 2010 Google. Image © 2011 Getmapping plc

Figura 53. Área de patio de RMGs (8) en APM Terminals Virginia (Norfolk - Estados Unidos)



Fuente: © 2010 Google

Figura 54. Área de patio de RMGs (g) en Antwerp Gateway Terminal - DP World (Amberes - Bélgica)



Fuente: © 2010 Google. © 2011 DigitalGlobe

La Tabla 25 muestra el resumen de las áreas, y las densidades de la terminal y de almacenamiento de cada una de las infraestructuras presentadas desde la Figura 40 a la Figura 54.

*Manual de capacidad portuaria:
aplicación a terminales de contenedores*

Tabla 25. Cuadro resumen de indicadores de productividad por superficie de algunas terminales de contenedores internacionales

Terminal	Equipo	Área de la Terminal (A_T) (ha)	Área de Almacenamiento (A_P) (ha) **	Nº huellas en área muestra	Área muestra (ha)	Densidad Almacenamiento (D_P) (h_TEU/h $_P$)
Global Gateway South Terminal, Los Angeles (EE.UU.)	Plataforma	119,0	71,0	2.640	10,3	257
California United Terminals, Long Beach (EE.UU.) *	Plataforma	60,1	32,6	1.224	5,0	247
Terminal P. Castellón, Castellón (España)	RS	11,9	6,4	280	1,4	201
Puerto Quetzal (Guatemala)	RS	59,0	13,6	216	0,9	229
San Antonio Terminal Internacional, San Antonio (Chile)	RS	31,8	16,4	480	1,7	276
TCB Barcelona, Barcelona (España)	SC	56,7	35,0	1.078	3,7	291
Eurogate Container Terminal, Hamburgo (Alemania)	SC	120,1	40,2	900	3,2	283
Noatum Container Terminal Valencia, Valencia (España)	RTG (6+1)	125,1	78,4	3.420	13,1	261
MSC Terminal Valencia, Valencia (España)	RTG (6+1)	32,6	20,2	2.700	10,1	268
Terminal Darsena Toscana, Livorno (Italia)	RTG (6+1)	42,1	6,3	528	1,7	305
TECON Santos, Santos (Brasil)	RTG (7+1)	59,7	12,7	735	2,4	301
Brani Terminal Singapur (Singapur)	RTG (8+1)	71,0	50,1	3.520	10,2	344
London Thamesport (Reino Unido)	RMG (9)	63,0	16,9	4.536	12,2	372
APM Terminals Virginia, Norfolk (EE.UU.)	RMG (8)	113,3	23,8	7.200	20,2	357
Antwerp Gateway Terminal – DP World, Amberes (Bélgica)	RMG (9)	126,6	8,8	2.214	6,5	342

NOTA *: Los datos correspondientes a la terminal California United Terminals (CUT) están basados en la foto aérea de Google de 28 de julio de 2008. En la actualidad han cambiado el equipo de patio de plataformas a RTGs.

NOTA **: El A_P de todas las terminales de esta tabla contempla exclusivamente el área reservada para el equipo de patio que caracteriza cada terminal.

Fuente: Google, entrevistas a las terminales y Fundación Valenciaport

Diversos autores (ver Tabla 26) han abordado empírica o analíticamente la estimación de las densidades superficiales de almacenamiento de las distintas tipologías de equipamiento de patio.

Tabla 26. Densidad superficial según autor y equipo de almacenamiento

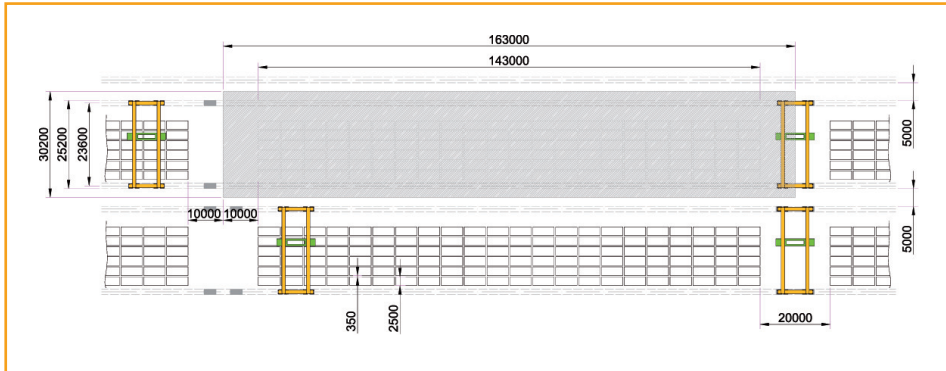
Autor	Densidad superficial (huellas_TEU/hectárea de patio)				
	Carretilla	<i>Reachstacker</i>	SC	RTG	RMG
Wieschmann (2004)	-	258	265	286	384
Kuznetsov (2008)	130	200	270	330	
OPPE (2006)	238	-	278	385	
Terminales Internacionales*	-	201 - 276	283-291	261 - 372	

NOTA *: Elaborado por Fundación Valenciport

Fuente: Fundación Valenciport a partir de varias fuentes

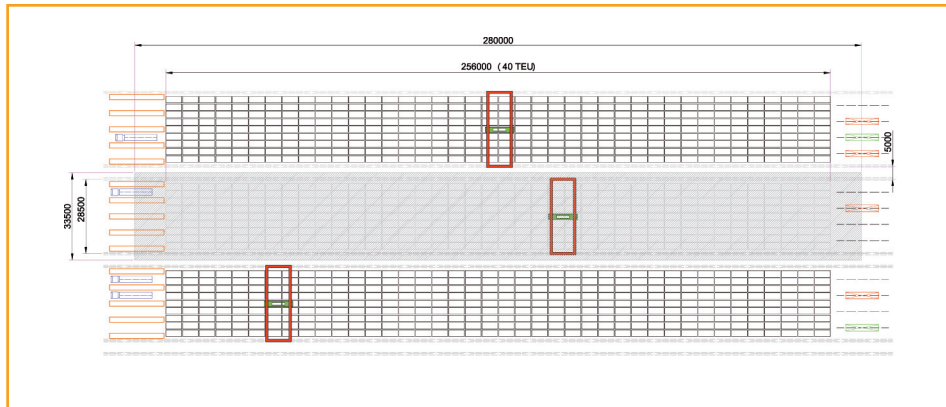
A modo de ejemplo, seguidamente se muestra el cálculo de N° Huellas_TEU por hectárea de patio realizado por Wieschmann y Rijsenbrij (2004) para un *layout* de RTGs (Figura 55) y otro de RMGs (Figura 56). En dichas figuras se distingue el área considerada como área de almacenamiento (rectángulos grises), donde se incluye parte del área dedicada a las infraestructuras (raíles para la superestructura, pasillos o viales para el transporte horizontal).

Figura 55. Ejemplo de *layout* del área de almacenamiento de una terminal con RTG (6 de ancho, 1 sobre 4)



Fuente: Wieschemann y Rijsenbrij (2004)

Figura 56. Ejemplo de *layout* del área de almacenamiento de una terminal con RMG (9 de ancho, 1 sobre 4)



Fuente: Wieschemann y Rijsenbrij (2004)

Wieschemann y Rijsenbrij (2004), han utilizado los *layouts* anteriores para calcular los valores de las densidades de estos sistemas de almacenamiento (Tabla 27). Seguidamente se muestra cómo está calculado el número de huellas_TEU (*ground slots*) por hectárea para los sistemas RTG y RMG (recogidos en la primera columna de dicha tabla):

- **RTG (6 de ancho, 1 sobre 4)**

Nº de TEUs = 6 (ancho) x 22 (largo) = 132 TEUs

Área de almacenamiento = 163 m x 30,2 m = 4.923 m² = 0,4923 ha

Densidad superficial = 132 h_TEU / 0,4923 ha = 268 huellas_TEU/ha

- **RMG (9 de ancho, 1 sobre 4)**

Nº de TEUs = 9 (ancho) x 40 (largo) = 360 TEUs

Área de almacenamiento = 280 m x 33,5 m = 9.380 m² = 0,938 ha

Densidad superficial = 360 h_TEU / 0,938 ha = 384 huellas_TEU/ha

La Tabla 27 muestra valores orientativos de la capacidad estática, medidos en huella_TEU/ha., considerando la configuración y la altura máxima de cada sistema (RS, SC, RTG, RMG, etc.) y el factor operacional (Wieschemann y Rijsenbrij, 2004).

Tabla 27. Valores de la capacidad estática de almacenamiento del patio de contenedores según el equipo

	Densidad superficial de patio (h-TEU/ha)	Altura máxima de apilado	Capacidad absoluta máxima (TEU/ha)	Factor operacional K (%)	Picos máximos de ocupación recomendados (%)	Media de capacidad (TEU/ha)	Capacidad en los picos (TEU/ha)	Capacidad estática de patio (TEUs/ha)
<i>Reachstacker</i> , bloques de 3 de ancho / 3 de alto	258	3	774	55	85	426	658	425
<i>Straddle carrier</i> 3 de alto (1 sobre 3) Espacio por fila contenedores: 4,1 m	265	3	795	60	80	477	636	475
RTG 6-ancho (1 sobre 4)	268	4	1.072	60	75	643	804	650
RTG 7-ancho (1 sobre 5)	286	5	1.430	55	75	787	1.073	800
RMG 9-ancho (1 sobre 4) Transferencia en las cabeceras de la pila	384	4	1.536	70	85	1.075	1.306	1.075
RMG 12-ancho (1 sobre 6) Transferencia en el lateral de la pila	291	6	1.746	60	85	1.048	1.484	1.050
WSG 18-ancho (1 sobre 5) + <i>Buffers</i> al lado de 3-ancho / 3-alturas	337	5	1.685	65	85	1.095	1.432	1.095
OBC 9-ancho o MT 10-ancho (1 sobre 4) Transferencia en las cabeceras de la pila	432	4	1.728	70	85	1.210	1.469	1.200
MT-stacker (8 profundo / 7 alturas)	375	7	2.625	65	90	1.706	2.363	1.700

NOTA 1: Las recomendaciones del ratio de ocupación del almacenamiento dependen de la estrategia de apilado y de la manejabilidad requerida.

NOTA 2: La media usual de ocupación operativa de almacenamiento viene determinada por la experiencia de muchas terminales.

NOTA 3: La nomenclatura es la empleada en el Manual; los valores son los originales.

Fuente: Fundación Valenciaport adaptado de Wieschermann y Rijsenbrij (2004).

Por su parte, Kuznetsov (2008) –véase Tabla 28– calcula el área de almacenamiento necesaria teniendo en cuenta los pasillos y viales entre bloques, más los viales que los circunvalan, para diferentes tipos de sistemas para grafiar 1.000 huellas_TEU dispuestas en 40 filas con 25 TEUs cada una de ellas. El área necesaria para almacenar dichas huellas, suponiendo que cada fila mide 150 metros de longitud (25 x 6 metros) y 2,5 metros de ancho y un pasillo alrededor de las pilas de 15 metros de ancho para el transporte horizontal, es de 2,34 hectáreas. Para cada sistema se necesitarán diferentes espacios entre bloques, en función de la disposición de las pilas y del equipo empleado, lo que conducirá a diferentes áreas y densidades de almacenamiento, como se detalla a continuación:

- Área de las 1.000 huellas + pasillo exterior = 2,34 ha (independiente del sistema)
- **Carretilla (FLT)**
Bloques de 2 filas de contenedores y 19 pasillos de 15 metros entre bloques.
Área pasillos internos = $19 \times 15 \text{ m} \times 180 \text{ m} = 5,13 \text{ ha}$
Área de almacenamiento = 2,34 ha + 5,13 ha = 7,47 ha
Densidad superficial = 134 huellas_TEU/ha
- **Reachstacker**
Bloques de 4 filas de contenedores y 9 pasillos de 15 metros entre bloques.
Área pasillos internos = $9 \times 15 \text{ m} \times 180 \text{ m} = 2,43 \text{ ha}$
Área de almacenamiento = 2,34 ha + 2,43 ha = 4,77 ha
Densidad superficial = 210 huellas_TEU/ha
- **Straddle carrier**
40 filas de contenedores y 39 pasillos de 2 metros de ancho entre filas.
Área pasillos internos = $39 \times 2 \text{ m} \times 180 \text{ m} = 1,404 \text{ ha}$
Área de almacenamiento = 2,34 ha + 1,404 ha = 3,744 ha
Densidad superficial = 267 huellas_TEU/ha
- **Grúas de patio (RTG/RMG)**
5 bloques de 8 filas de contenedores y 4 pasillos de 10 metros entre bloques.
Área pasillos internos = $4 \times 10 \text{ m} \times 180 \text{ m} = 0,72 \text{ ha}$
Área de almacenamiento = 2,34 ha + 0,72 ha = 3,06 ha
Densidad superficial = 327 huellas_TEU/ha

Tabla 28. Densidad superficial de almacenamiento según sistema de patio

Sistema de almacenamiento	FLT 2-ancho	RS 4-ancho	SC	RTG/RMG 8-ancho
Espacio entre bloques (pasillos internos)	15 m	15 m	2 m	10 m
Pasillos que circunvalan los bloques	15 m	15 m	15 m	15 m
m ² /huella_TEU	75	50	37	30
Huellas_TEU/ha	130	200	270	330

Fuente: Kuznetsov (2008) y Fundación Valenciaport

Además de las referencias aquí presentadas, cabe citar otras fuentes bibliográficas sobre este tema, tales como: UNCTAD (1984); Alderton (1999); Thoresen (2003), Henesey (2006), González-Herrero et al. (2006), OPPE (2006), etc.

Como se ha visto, los valores de la densidad superficial del patio de almacenamiento pueden variar sensiblemente según el autor y el tipo de terminal. A la hora de utilizar alguna referencia para el dimensionamiento o el cálculo de la capacidad del patio de contenedores, hay que comprobar qué áreas se han tenido en cuenta en los indicadores consultados. Lo más operativo y recomendable para dimensionar un patio de contenedores y calcular sus densidades superficiales y su capacidad, es plantear varias alternativas de *layouts*, es decir, varios planos con la disposición de las huellas para cada una de las configuraciones que se quieran comparar, considerando además diferentes sistemas de manipulación, para elegir el más adecuado.

Altura operativa media de apilado: la capacidad estática de almacenamiento

El producto de la densidad superficial del patio por la altura operativa media de apilado da como resultado la capacidad estática de almacenamiento del patio. Su unidad es TEUs/ha de patio.

Wieschemann y Rijsenbrij (Tabla 27) aportan valores de capacidad estática de almacenamiento en función del tipo de equipamiento de patio calculados a partir de la densidad superficial, la altura máxima de apilado y un factor operacional que varía entre 0,55 y 0,70. El producto de estos dos últimos es h –altura operativa media de apilado–.

En la referida Tabla 27 también se facilita una estimación de la capacidad de almacenamiento punta o pico obtenida a partir de la altura máxima de apilado, empleando un factor de punta que varía entre 0,75 y 0,90.

La Tabla 29 resume los valores de la capacidad estática de almacenamiento (para altura operativa media) y de capacidad de almacenamiento en punta (picos) manejados por diversos autores. Al ser las referidas capacidades consecuencia del producto de la densidad superficial (huellas_TEU/ha de patio) por la altura operativa media y de punta, respectivamente, estimadas por cada autor, los resultados presentan la correspondiente dispersión.

Tabla 29. Capacidad estática – internalizando la altura de apilado – según autor y tipo de equipo de almacenamiento

		Carretilla (3+1) RS (3+1)	SC (3+1)	RTG (6;4+1)	RTG (7;5+1)	RMG (9;4+1)	RMG (12; 6+1)
Gilman (1982)	Operacional	315	465	675			
	En punta						
UNCTAD (1985)	Operacional		500				
	En punta			667	1.000		
Rodríguez (1985)	Operacional	288-360	411-514		800		
	En punta	540	771		1.500		
Thorensen (2003)	Operacional	417					
	En punta		625	1.000	1.428	1.250	
Henese y (2004)	Operacional		500				
	En punta			833		1.250	
Wiesche- mann y Rijssenbrij (2004)	Operacional	425	475	650	800	1.075	1.050
	En punta	658	636	804	1.073	1.306	1.484
González- Herrero et al. (2006)	Operacional	417					
	En punta		625	1.000		1.250	
Saanen (2007)	Operacional						
	En punta	540	675	800	1.000	1.300	1.500
Koch (2008)	Operacional				861		
	En punta						
FV (2011)	Operacional	360-470	480-595	625-720	800-855	955-1.205	
	En punta						

Fuente: Fundación Valenciaport a partir de varias fuentes

Tiempo de estancia

Y por último se analiza el tiempo de estancia, que es un factor “dinámico”. Cada terminal tiene una capacidad estática que sería el número máximo de *slots* por hectárea, y que es función del equipo empleado en patio. Considerando además el número medio anual de rotaciones, que es función del tiempo medio de estancia de los contenedores en el patio, se obtiene la capacidad anual. Así el tiempo medio de estancia de los contenedores es un factor inversamente proporcional a la capacidad. Por ejemplo, al pasar de 11 días de estancia media a 10 días, se incrementa la capacidad anual del patio en un 10%.

Normalmente el tiempo de estancia en puerto para los contenedores de exportación es algo menor que para los de importación. Según un estudio realizado en algunos puertos europeos (Dekker, 2005) los tiempos varían entre 4 y 7 días en función del puerto, del tipo de contenedor (importación o exportación) y del medio de transporte mediante el que este entra o sale del puerto.

En España los tiempos de estancia generalmente son algo mayores a los de dicho estudio. De acuerdo con las entrevistas realizadas a algunos operadores de terminales de contenedores españoles, los tiempos medios de estancia por tipo de contenedor son los siguientes:

- Exportación lleno: 5 - 9 días.
- Exportación vacío: 12 - 14 días.
- Importación lleno: 8 - 10 días.
- Importación vacío: 15 - 20 días.
- Transbordo lleno: 4 - 7 días.
- Transbordo vacío: 20 días.

5.4.2.4. Recomendaciones sobre capacidad de almacenamiento de las terminales de contenedores

A partir de la bibliografía estudiada y de los casos reales analizados se proponen unas recomendaciones sobre la densidad superficial, la altura operativa media de apilado y la capacidad estática de la terminal, en función del equipo de almacenamiento, tal y como muestra la Tabla 30.

$$C_p = N^{\circ} \text{ Huellas}_{TEU} \times h \times \frac{365}{T_a}$$

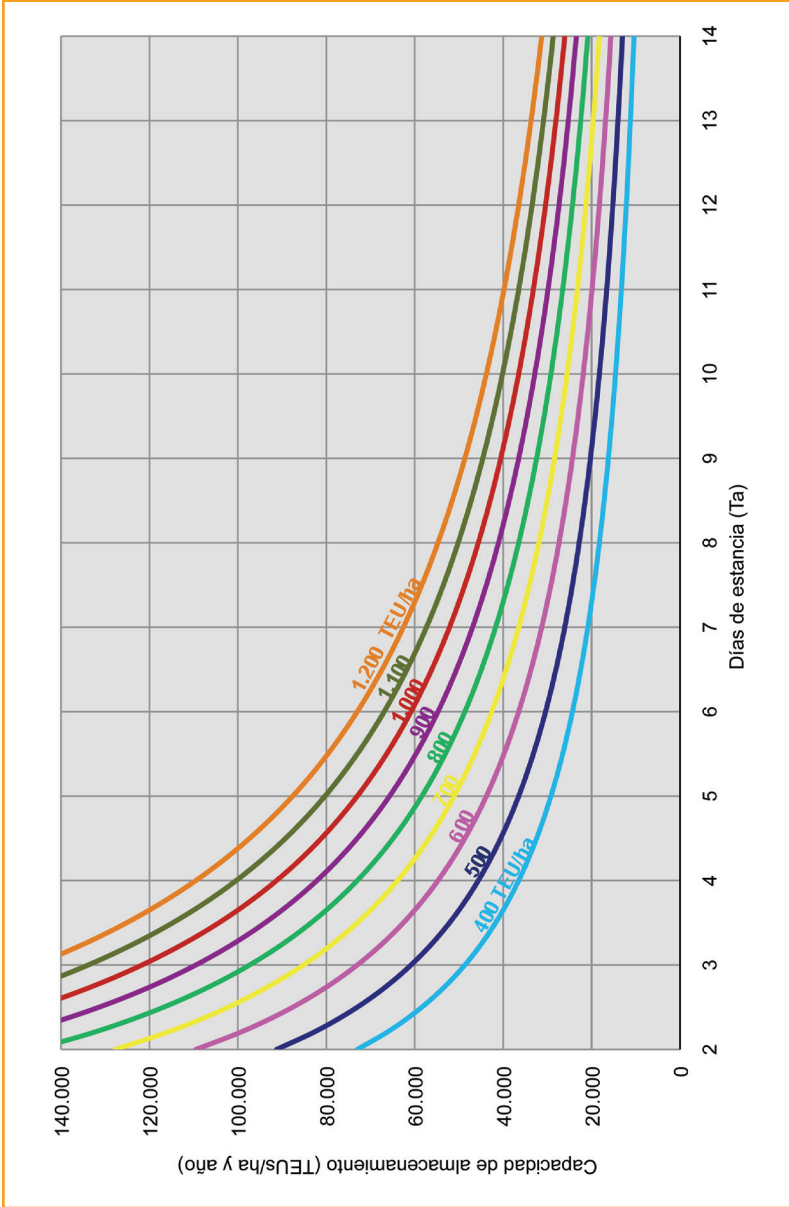
Tabla 30. Densidad superficial, altura operativa media de apilado y capacidad estática de las terminales de contenedores según el tipo de equipo de almacenamiento

Equipo (anchura; altura nominal de apilado)	Densidad Superficial (Huellas_TEU/ ha)	Altura operativa media (h)	Densidad del sistema o Capacidad Estática (TEUs/ha)
Plataforma/Chasis	150 - 250	1,00	150 - 250
Carretilla (-; 3)	130 - 190	1,80	235 - 345
Reachstacker (-; 3)	200 - 260	1,80	360 - 470
SC (-; 3+1)	265 - 290	1,80	480 - 525
RTG (6; 4+1)	260 - 300	2,40	625 - 720
RTG (7; 5+1)	290 - 310	2,75	800 - 855
RTG (8; 5+1)	300 - 350	2,75	825 - 965
RMG (9; 4+1)	340 - 430	2,80	955 - 1.205

Fuente: Fundación Valenciaport

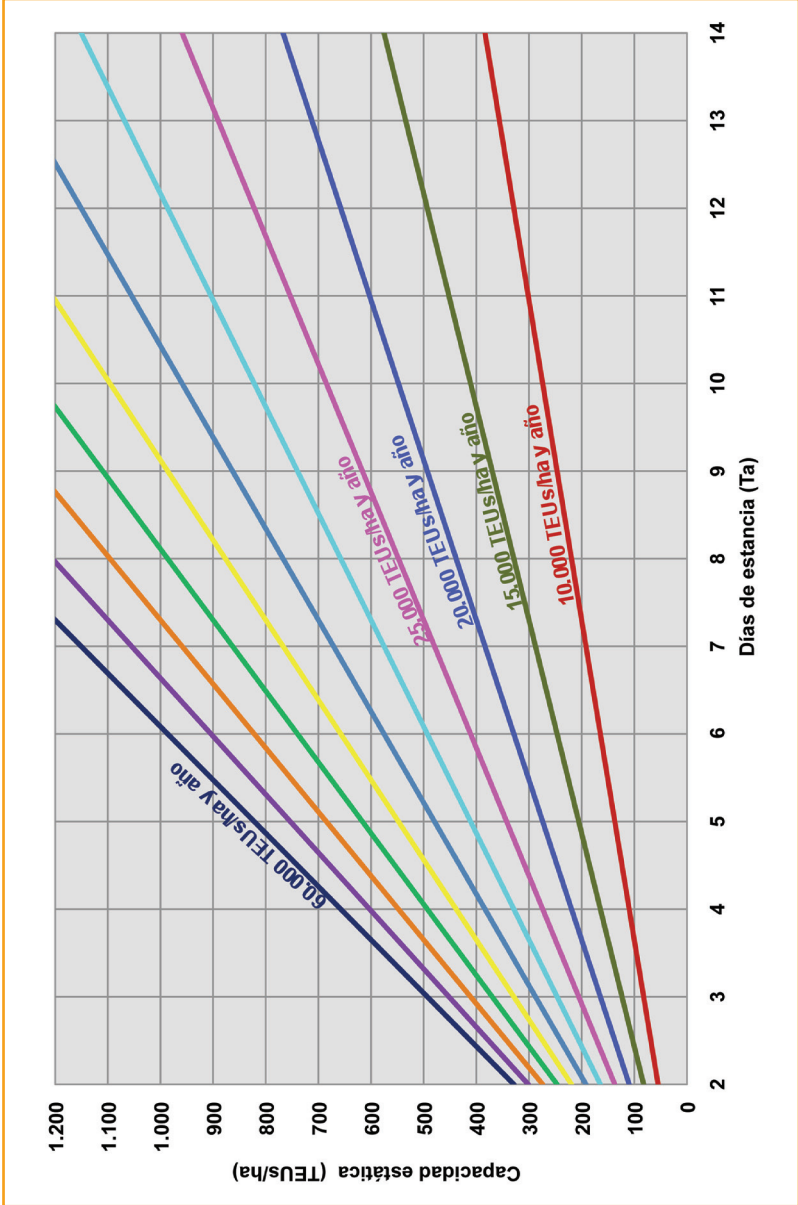
Una vez se obtiene la capacidad estática del patio de la terminal, la capacidad anual de almacenamiento variará en función de los días de estancia de los contenedores en el mismo, tal y como está representado en los Gráficos 11 y 12.

Gráfico 11. Capacidad anual de almacenamiento (TEUs/ha año) en función de la densidad de almacenamiento y de los días de estancia



Fuente: Fundación Valenciaport

Gráfico 12. Capacidad estática del equipo de patio como resultado de las necesidades de capacidad anual y de los días de estancia



Fuente: Fundación Valenciaport

Por ejemplo, para el caso de una terminal que emplea un sistema con una capacidad estática de 400 TEUs/ha (RS) y con un tiempo de estancia medio de 5 días, la capacidad anual de dicha terminal será algo superior a 29.000 TEUs/ha año (Gráfico 10), de modo que si dispone de 20 hectáreas de patio la capacidad de la terminal de almacenamiento será de 580.000 TEUs anuales.

En el caso de planificar una terminal con una capacidad máxima de 60.000 TEUs/ha año y con una estancia media de los contenedores de 5 días, se debería emplear un sistema con una capacidad de al menos 800 TEUs por hectárea de patio, es decir, un RTG.

Cada uno según su capacidad, a cada uno según sus necesidades

Karl Marx, intelectual



Ejemplos de cálculos de capacidad

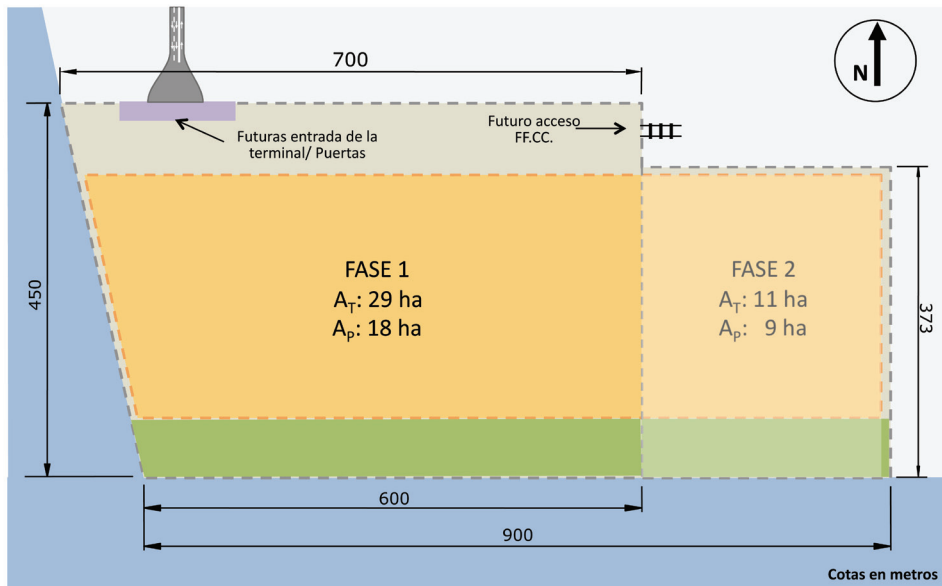
En este capítulo se presenta un ejercicio práctico sobre cómo calcular la capacidad de una terminal portuaria de contenedores hipotética para cada uno de los escenarios que se plantean a lo largo del mismo. Para su solución se utilizan las consideraciones teóricas planteadas en los capítulos anteriores.

6.1. Enunciado y datos de partida de las nuevas terminales portuarias de contenedores

La Autoridad Portuaria de Valle Verde (APVV) va a realizar la inversión correspondiente a la obra civil de una terminal de contenedores en dicho puerto. La construcción de esta terminal se realizará en dos fases: en la Fase 1 la terminal dispondrá de un muelle de 600 metros de longitud y 18 hectáreas de área de patio, y en la Fase 2 se ampliará la línea de atraque en 300 metros y el patio en 9 hectáreas, quedando con un total de 900 metros de línea de atraque y un área total de patio de 27 hectáreas (véase Figura 57). Esta infraestructura, una vez completada la Fase 1, se concesionará por un periodo de 20 años a una empresa estibadora privada, a través de un concurso internacional, para su explotación en régimen de Terminal Pública (TP). Simultáneamente, un importante grupo naviero se ha dirigido a la APVV solicitando una concesión, también de 20 años, para la explotación de una Terminal Dedicada (TD) de contenedores. Esta segunda terminal será ejecutada

por el propio grupo naviero con las mismas características físicas y fases que la primera. Ambas terminales son compatibles, tanto desde la perspectiva estratégica (Plan Estratégico de la APVV) como espacial (Plan Maestro del Puerto). Sus respectivas segundas fases se activarán de acuerdo con el Nivel de Servicio a disponer.

Figura 57. Terminal de Contenedores tipo (TP yTD) - Puerto Valle Verde



Fuente: Fundación Valenciaport

En la Tabla 31 se muestran los datos de las Terminales de Contenedores de la Dársena Sur del Puerto de Valle Verde.

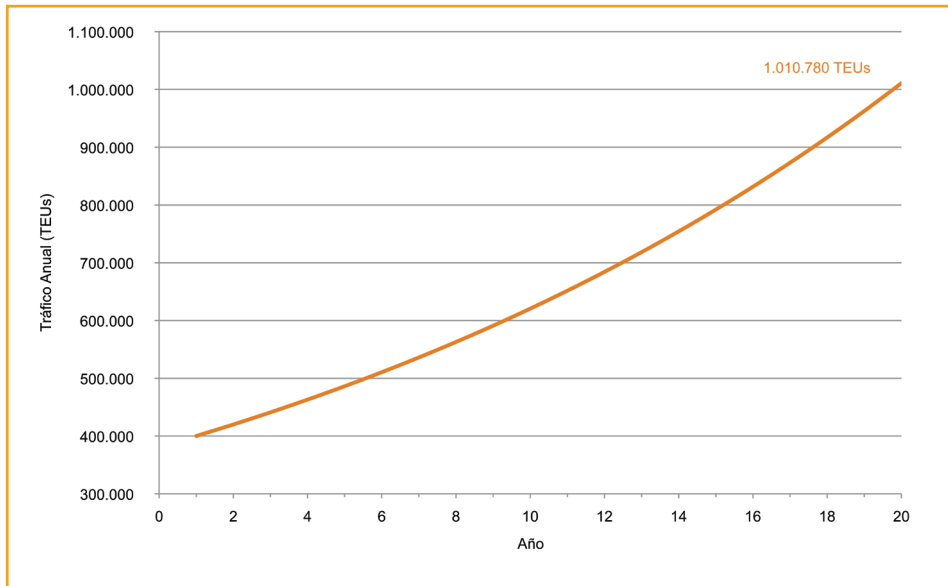
Tabla 31. Datos físicos y operativos de la Terminal de Contenedores tipo (TP y TD) de la Dársena Sur del Puerto de Valle Verde

	Fase 1	Fase 2
Longitud de muelle (metros)	600	900
Superficie de la terminal (hectáreas)	29	40
Superficie de almacenamiento (hectáreas)	18	27
Eslora del buque tipo (metros)	270	270
Días de operación del puerto/año (días)	360	
Horas operativas por días (h)	24	
Calado (metros)	16	
Carrera de marea (metros)	0,3	
Ratio TEUs/Contenedor	1,5	

Fuente: Fundación Valenciaport

La previsión de tráfico (*throughput*) es de 400.000 TEUs durante el primer año de funcionamiento de las terminales, con un crecimiento sostenido del 5% anual hasta el año 20. En el Gráfico 13 se puede observar la evolución del tráfico para ambas terminales de contenedores de la Dársena Sur a lo largo del periodo de concesión. Para la TP se estima un transbordo del 15% y para la TD del 75%.

Gráfico 13. Previsión de tráfico de las terminales tipo TP y TD Dársena Sur Puerto de Valle Verde



Fuente: Fundación Valenciaport

El tiempo medio de estancia de los contenedores en patio (T_o) durante la concesión, es de 6 días; mientras que las condiciones de prestación del servicio exigidas por la APVV varían a lo largo de la concesión y dependen de si la terminal es pública (TP) o dedicada (TD).

Para la TP, los niveles de servicio (NdS) mínimos exigidos por la APVV en el contrato de concesión referentes a la espera relativa de la línea de atraque y a la productividad de buque atracado (P) son:

- Nivel de servicio asociado a la espera relativa: C (T_e/T_s entre 0,1 y 0,2)
- Nivel de servicio asociado a la productividad del buque atracado (P): C (entre 35 y 50 cont./h)
 - Desde inicio de la concesión hasta los 10 años, la P mínima debe ser de 40 cont./hora
 - De 10 a 15 años, la P mínima debe ser el 10% mayor que la inicial
 - De 15 a 20 años, la P mínima debe ser el 20% mayor que la inicial

Y en el caso de la TD el propio operador ha ofertado:

- Nivel de servicio asociado a la espera relativa: $B (T_e/T_s$ entre 0,05 y 0,1)
- Nivel de servicio asociado a la productividad del buque atracado (P):A (>65 cont./h)
 - Desde inicio de la concesión hasta los 10 años, la P mínima debe ser de 65 cont./hora
 - De 10 a 15 años, la P mínima debe ser de 70 cont./hora
 - De 15 a 20 años, la P mínima debe ser de 75 cont./hora

Cuestiones a resolver:

1. ¿Cuál es la capacidad por línea de atraque (NdS C) de la **Terminal Pública** a lo largo de toda la concesión, y en qué momento será necesaria la Fase 2, teniendo en cuenta las previsiones de tráfico dadas?
2. ¿Cuál es la capacidad por línea de atraque (NdS B) de la **Terminal Dedicada** a lo largo de toda la concesión, y en qué momento será necesaria la Fase 2, teniendo en cuenta las previsiones de tráfico dadas?
3. Si la estancia media prevista de los contenedores en la terminal es de 6 días, ¿qué equipo de patio es más conveniente para cada terminal valorando estrictamente temas de capacidad, RTG o *straddle carrier* (SC)? ¿Cómo variaría la capacidad según el equipo de patio, en función de los días de estancia?
4. Teniendo en cuenta los resultados de las cuestiones anteriores, y sólo para el equipo de patio más conveniente en cada caso, ¿cuál sería la capacidad de cada Terminal de Contenedores y en qué momentos la Fase 2 de la terminal debería ponerse en funcionamiento, tanto para la TP como para la TD?

6.2. Cálculo de capacidad por línea de atraque

Resolución de Cuestión I

En primer lugar se calcula el número de atraques de la futura Terminal Pública de Contenedores de la Dársena Sur. El número de atraques en la primera y segunda fase, teniendo en cuenta que el buque tipo es de 270 metros y que se considera un resguardo adicional

del 10% de la eslora (coeficiente de separación entre buques), resulta ser 2 y 3 respectivamente:

$$\text{Fase 1: } n = 600 / (270 \times 1,1) = 2 \text{ atraques}$$

$$\text{Fase 2: } n = 900 / (270 \times 1,1) = 3 \text{ atraques}$$

De acuerdo con el enunciado, la productividad del buque atracado mínima para los primeros 10 años de concesión es de 40 contenedores/hora. Asimismo, para cumplir con el contrato, durante la etapa comprendida entre los 10 y 15 años la P debe ser un 10% mayor, y durante la última etapa (año 15 al año 20) un 20% mayor respecto al valor inicial. A partir de estas condiciones se obtienen las productividades que se pueden ver en la Tabla 32.

Tabla 32. Productividad de buque mínima a lo largo de la concesión de una terminal pública

Periodo	Productividad de buque mínima (P) (contenedores/hora)
0-10 años	40
10-15 años	44
15-20 años	48

Fuente: Fundación Valenciaport

Siguiendo las recomendaciones del Apartado 5.3.2.1 para terminales públicas se aplica un sistema de caracterización de tráfico tipo $M/E_4/n$, es decir, con distribución de llegadas aleatorias (M), con tiempos de servicio según Erlang 4 (E_4) y n puestos de atraque.

Por otro lado, en la Tabla 22 se asigna para un nivel de servicio C (como indica el enunciado) unos límites de calidad de servicio (T_e/T_s) de 0,10 a 0,20. De acuerdo con estos, en los cálculos de capacidad por línea de atraque se debe garantizar que en todo momento la espera relativa sea menor de 0,20, y es este límite el que determina en qué momento se debe realizar la Fase 2.

Conocida la variable P para cada periodo y el número de atraques de cada fase, la Tabla 20 del Apartado 5.3.2.4 permite hallar directamente para ciertas productividades de buque, en función de la caracterización del sistema, la capacidad anual por línea de atraque para calidades de servicio del 5%, 10% y 20%. Es importante recordar que dicha tabla ha sido calculada para determinados parámetros como son: longitud de puestos de atraque de 300 metros y 8.640 horas operativas anuales (360 días operativos/año \times 24 horas/día), que coinciden con los datos planteados en el presente ejercicio. Cualquier terminal de contenedores, cuyos datos físicos y operativos difieran de los anteriores, requerirá llevar a cabo los cálculos de capacidad (C_{LA}) mediante su fórmula (véase Apartado 5.3.1), que en este ejemplo se utiliza para las productividades que no han sido recogidas dicha tabla.

La capacidad por línea de atraque para una productividad de 40 contenedores/hora está contemplada directamente en la Tabla 20. En el caso de las productividades comprendidas entre los años 10 y 15 ($P_{10-15} = 44$ contenedores/hora) y los 15 y 20 años ($P_{15-20} = 48$ contenedores/hora) la capacidad se obtiene mediante la fórmula antes mencionada del Apartado 5.3.1 ($C_{LA} = n \times \phi \times t_{año} \times P$), utilizando la Tabla 16 (o el Gráfico 2) para hallar la tasa de ocupación admisible (Φ) correspondiente a la calidad de servicio requerida, o también interpolando los valores de capacidad puesto que la P tiene una proporcionalidad directa con la misma.

Finalmente, aplicando el ratio TEU/contenedor de 1,5 (dato del enunciado, véase Tabla 31) se obtienen los resultados de capacidad por línea de atraque. Las Tablas 33 y 34 los muestran separados según el método empleado para su cálculo.

Tabla 33. Capacidad por línea de atraque de la TP de la Dársena Sur para una productividad de 40 contenedores/hora

Capacidad por línea de atraque de la TP (M/E ₄ /n) de la Dársena Sur – Fase 1 y Fase 2				
$t_{\text{año}}$: Horas operativas de la terminal/año: 8.640 (360 días x 24 horas/día)				
P: Productividad buque atracado: 40 contenedores/hora				
Factor de conversión de TEUs/contenedor=1,5				
	$T_e/T_s=0,10$		$T_e/T_s=0,20$	
	Fase 1	Fase 2	Fase 1	Fase 2
n : N° de atraques	2	3	2	3
Longitud de Muelle (m)	600	900	600	900
Capacidad por metro línea de atraque (cont./m línea atraque y año)	415	560	560	700
C_{1P50} : Sistema M/E ₄ /n (cont./año)	249.000	504.000	336.000	630.000
C_{2P50}: Sistema M/E₄/n (TEUs/año)	373.500	756.000	504.000	945.000

Fuente: Fundación Valenciaport

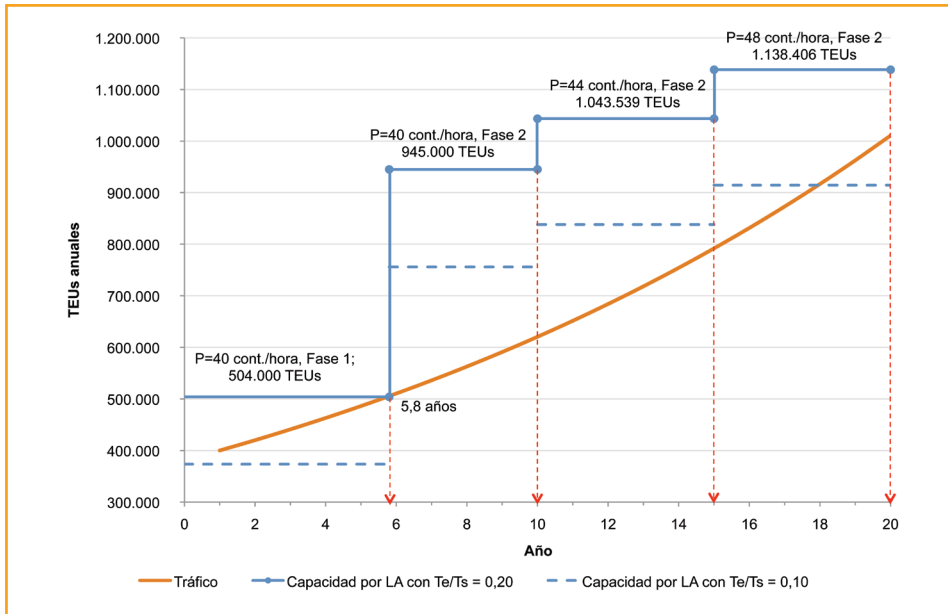
Tabla 34. Capacidad por línea de atraque de la TP de la Dársena Sur para productividades de 44 y 48 contenedores/hora

Capacidad por línea de atraque de la TP (M/E ₄ /n) de la Dársena Sur – Fase 1 y Fase 2					
$t_{\text{año}}$: Horas operativas de la terminal/año: 8.640 (360 días x 24 horas/día)					
Factor de conversión de TEUs/contenedor=1,5					
	$T_e/T_s=0,10$		$T_e/T_s=0,20$		
	Fase 1	Fase 2	Fase 1	Fase 2	
n : N° de atraques	2	3	2	3	
$\Phi 1$: Contenedores – Sistema M/E ₄ /n	0,36	0,49	0,49	0,61	
$P=44$ cont./hora	C_{1P44} : Sistema M/E ₄ /n (cont./año)	273.715	558.835	372.557	695.693
	C_{2P44}: Sistema M/E₄/n (TEUs/año)	410.573	838.253	558.835	1.043.539
$P=48$ cont./hora	C_{1P48} : Sistema M/E ₄ /n (cont./año)	298.598	609.638	406.426	758.938
	C_{2P48}: Sistema M/E₄/n (TEUs/año)	447.898	914.458	609.638	1.138.406

Fuente: Fundación Valenciaport

En el Gráfico 14 se determina en función de la capacidad calculada para una calidad de servicio $T_e/T_s = 0,20$, en qué momento se debe realizar la Fase 2.

Gráfico 14. Comparación de la capacidad por línea de atraque de la TP con la previsión de tráfico



Fuente: Fundación Valenciaport

Según la línea continua azul, que representa la capacidad de la TP para una calidad de servicio 0,20, la Fase 2 es necesaria a los 5,8 años de concesión, y una vez realizada dicha fase, la TP con los sucesivos incrementos de P impuestos en contrato tendrá suficiente capacidad para satisfacer las previsiones de tráfico a lo largo del resto de concesión (1.138.496 TEUs los últimos 5 años de concesión).

Además en dicho gráfico la línea discontinua azul, representa la capacidad por línea de atraque para una calidad de servicio 0,10, el límite inferior del nivel de servicio C. Se observa que hasta los 5,8 años, la calidad de servicio para el tráfico establecido estará entre los 0,10 y 0,20, pero con el crecimiento del tráfico cada vez se harán más largas las

esperas de los buques hasta alcanzar el límite del 20% de tiempo de espera medio sobre tiempo de servicio medio. Al entrar en funcionamiento la Fase 2, y prácticamente hasta los 18 años de concesión, la espera relativa ofrecida será incluso menor que el 0,10, por lo que los buques tendrán unos tiempos de espera menores de los que se corresponderían para un Nds C, percibiendo una calidad de servicio mejor.

Por otra parte, llama la atención como se puede ver en la Tabla 33 y Tabla 34, que para las tres productividades previstas, si se empeora la calidad de servicio en un 100%, es decir se pasa de 0,10 a 0,20, la capacidad por línea de atraque sólo aumenta de media un 35,7% en la Fase 1 ($n = 2$) y un 24,7 % en la Fase 2 ($n = 3$).

Por el contrario, con tan solo aumentar en un 50% los atraques, pasando de 2 (Fase 1) a 3 puestos de atraque (Fase 2), la capacidad por línea de atraque, aumenta de media un 103,6% con $T_e/T_s = 0,10$, y un 87% con $T_e/T_s = 0,20$.

Resumiendo, es importante destacar que mientras que la capacidad aumenta (o disminuye) en la misma proporción que el aumento (o disminución) de la productividad del buque atracado, esta proporcionalidad no se mantiene al modificar la calidad de servicio o el número de atraques. Ello es debido a que la tasa de ocupación de muelle admisible depende de estas dos variables.

Resolución de Cuestión 2

Como en la cuestión anterior, la capacidad se calcula con ayuda de la Tabla 20 del Apartado 5.3.2.4 y la fórmula de capacidad del Apartado 5.3.1, en base a las recomendaciones del Apartado 5.3.2.1, que asigna para una TD una distribución tipo $E_2/E_4/n$ donde las llegadas son muy programadas. Sin embargo, en casos más desfavorables se considera que dichas llegadas son más bien aleatorias y se recomienda la distribución tipo $M/E_4/n$. En este ejercicio la capacidad por línea de atraque está calculada para los 2 supuestos.

Los datos de partida a introducir en la Tabla 20 para hallar la capacidad anual por línea de atraque en este caso ya están calculados; la productividad de buque (P) mínima ha quedado fijada en la oferta de concesión, y el número de puestos de atraque de cada fase no depende del tipo de terminal y por tanto es el mismo que el de la Cuestión 1, $n = 2$ para la Fase 1 y $n = 3$ para la Fase 2. La siguiente tabla resume los requisitos de productividad de buque:

Tabla 35. Productividad de buque mínima a lo largo de la concesión de una terminal dedicada (TD)

Periodo	Productividad de buque mínima (P) (contenedores/hora)
0-10 años	65
10-15 años	70
15-20 años	75

Fuente: Fundación Valenciaport

Como sucede en la cuestión anterior, para la distribución $E_2/E_4/n$ la capacidad por línea de atraque para una de esas productividades (70 contenedores/hora) se puede obtener de la Tabla 20, pero la $P_{0-10} = 65$ contenedores/hora y la $P_{15-20} = 75$ contenedores/hora se calcula mediante la fórmula de capacidad (Apartado 5.3.1) y la Tabla 16 del Capítulo 5 para la obtención de Φ . Igualmente, para la distribución $M/E_4/n$, la Tabla 20 sólo determina la capacidad por línea de atraque para la $P_{10-15} = 70$ contenedores/hora, por lo que para calcular la capacidad para P_{0-10} y P_{15-20} se usan la fórmula y la Tabla 16.

Y tal como se indica en la Tabla 22, para un nivel de servicio B como indica el enunciado, corresponde una calidad de servicio (T_e/T_s) entre 5% y 10%. Y así como en la primera cuestión, la TD debe garantizar que la calidad de servicio sea siempre inferior al límite superior de espera relativa del rango, en este caso menor al 10%, con lo cual la capacidad para esa calidad de servicio es la que marca la necesidad de la Fase 2 y el momento de ejecutarla.

La Tabla 36 y la Tabla 37 muestran las capacidades por línea de atraque para las dos fases de una TD con una distribución tipo $E_2/E_4/n$, separadas según el método empleado para su cálculo.

Tabla 36. Capacidad por línea de atraque de la TD ($E_2/E_4/n$) de la Dársena Sur para una productividad de 70 contenedores/hora

Capacidad por línea de atraque de la TD ($E_2/E_4/n$) de la Dársena Sur – Fase 1 y Fase 2				
$t_{\text{año}}$: Horas operativas de la terminal/año: 8.640 (360 días x 24 horas/día)				
P: Productividad buque atracado: 70 contenedores/hora				
Factor de conversión de TEUs/contenedor=1,5				
	$T_e/T_s=0,05$		$T_e/T_s=0,10$	
	Fase 1	Fase 2	Fase 1	Fase 2
n: N° de atraques	2	3	2	3
Longitud de Muelle (m)	600	900	600	900
Capacidad por metro línea de atraque (cont./m línea atraque y año)	865	1.065	1.065	1.270
C_{1P70} : Sistema $E_2/E_4/n$ (cont./año)	519.000	958.500	639.000	1.143.000
C_{2P70} : Sistema $E_2/E_4/n$ (TEUs/año)	778.500	1.437.750	958.500	1.714.500

Fuente: Fundación Valenciaport

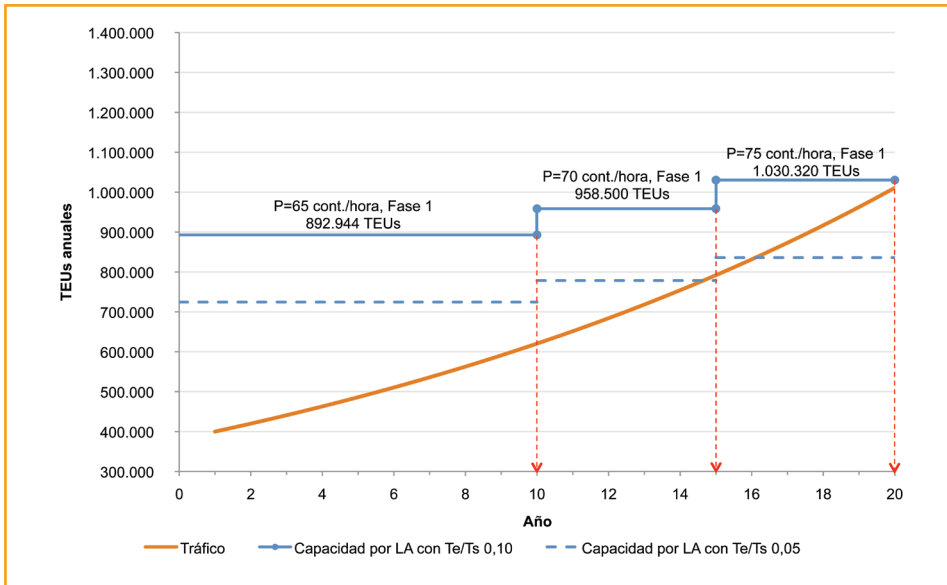
Tabla 37. Capacidad por línea de atraque de la TD ($E_2/E_4/n$) de la Dársena Sur para productividades de 65 y 75 contenedores/hora

Capacidad por línea de atraque de la TD ($E_2/E_4/n$) de la Dársena Sur – Fase 1 y Fase 2					
$t_{\text{año}}$: Horas operativas de la terminal/año: 8.640 (360 días x 24 horas/día)					
Factor de conversión de TEUs/contenedor=1,5					
	$T_e/T_s=0,05$		$T_e/T_s=0,10$		
	Fase 1	Fase 2	Fase 1	Fase 2	
n: N° de atraques	2	3	2	3	
Φ 1: Contenedores – Sistema $E_2/E_4/n$	0,43	0,53	0,53	0,63	
P=65 cont./h	C_{1P65} : Sistema $E_2/E_4/n$ (cont./año)	482.976	892.944	595.296	1.061.424
	C_{2P65} : Sistema $E_2/E_4/n$ (TEUs/año)	724.464	1.339.416	892.944	1.592.136
P=75 cont./h	C_{1P75} : Sistema $E_2/E_4/n$ (cont./año)	557.280	1.030.320	686.880	1.224.720
	C_{2P75} : Sistema $E_2/E_4/n$ (TEUs/año)	835.920	1.545.480	1.030.320	1.837.080

Fuente: Fundación Valenciaport

Como se ve en el Gráfico 15, para la distribución tipo $E_2/E_4/n$ con llegadas muy programadas, la TD no necesita ejecutar la Fase 2 porque la capacidad por línea de atraque para una calidad de servicio de 10% es superior al tráfico previsto durante toda la concesión; es más, dicha calidad de servicio es mejor al 5% hasta pasados los 16 años de concesión.

Gráfico 15. Comparación de la capacidad por línea de atraque de la TD ($E_2/E_4/n$) con la previsión de tráfico



Fuente: Fundación Valenciaport

Análogamente, la Tabla 38 y la Tabla 39 muestran las capacidades por línea de atraque para las dos fases de la TD con una distribución tipo $M/E_4/n$.

Tabla 38. Capacidad por línea de atraque de la TD (M/E₄/n) de la Dársena Sur para una productividad de 70 contenedores/hora

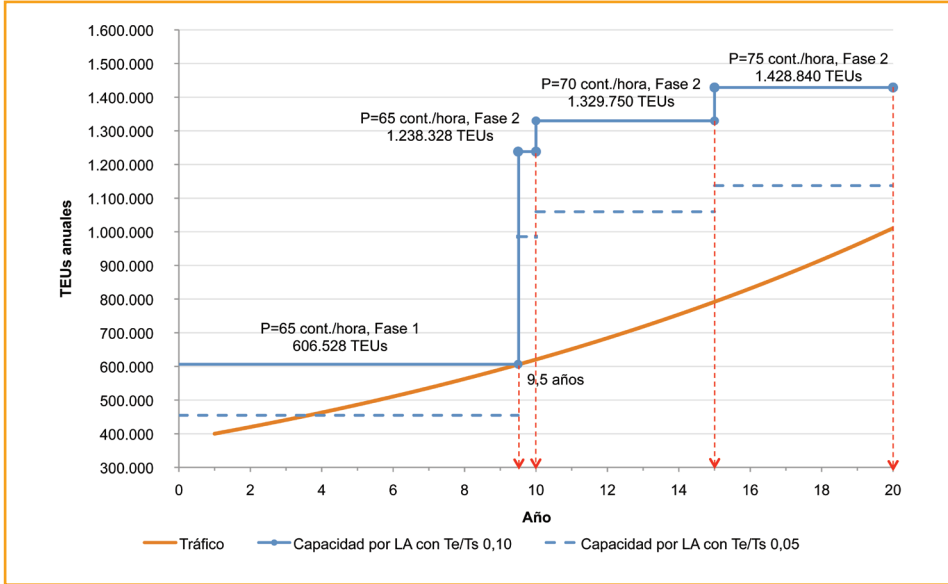
Capacidad por línea de atraque de la TD (M/E ₄ /n) de la Dársena Sur – Fase 1 y Fase 2				
$t_{\text{año}}$: Horas operativas de la terminal/año: 8.640 (360 días x 24 horas/día)				
P: Productividad buque atracado: 70 contenedores/hora				
Factor de conversión de TEUs/contenedor=1,5				
	$T_c/T_s=0,05$		$T_c/T_s=0,10$	
	Fase 1	Fase 2	Fase 1	Fase 2
n: N° de atraques	2	3	2	3
Longitud de Muelle (m)	600	900	600	900
Capacidad por metro línea de atraque (cont./m línea atraque y año)	540	785	725	985
C_{1P70} : Sistema M/E ₄ /n (cont./año)	324.000	706.500	435.000	886.500
C_{2P70} : Sistema M/E ₄ /n (TEUs/año)	486.000	1.059.750	652.500	1.329.750

Fuente: Fundación Valenciaport

Tabla 39. Capacidad por línea de atraque de la TD (M/E₄/n) de la Dársena Sur para productividades de 65 y 75 contenedores/hora

Capacidad por línea de atraque de la TD (M/E ₄ /n) de la Dársena Sur – Fase 1 y Fase 2					
$t_{\text{año}}$: Horas operativas de la terminal/año: 8.640 (360 días x 24 horas/día)					
Factor de conversión de TEUs/contenedor=1,5					
	$T_c/T_s=0,05$		$T_c/T_s=0,10$		
	Fase 1	Fase 2	Fase 1	Fase 2	
n: N° de atraques	2	3	2	3	
$\Phi 1$: Contenedores – Sistema M/E ₄ /n	0,27	0,39	0,36	0,49	
P=65 cont./h	C_{1P65} : Sistema M/E ₄ /n (cont./año)	303.264	657.072	404.352	825.552
	C_{2P65} : Sistema M/E ₄ /n (TEUs/año)	454.896	985.608	606.528	1.238.328
P=75 cont./h	C_{1P75} : Sistema M/E ₄ /n (cont./año)	349.920	758.160	466.560	952.560
	C_{2P75} : Sistema M/E ₄ /n (TEUs/año)	524.880	1.137.240	699.840	1.428.840

Fuente: Fundación Valenciaport

Gráfico 16. Comparación de la capacidad por línea de atraque de la TD ($M/E_4/n$) con la previsión de tráfico

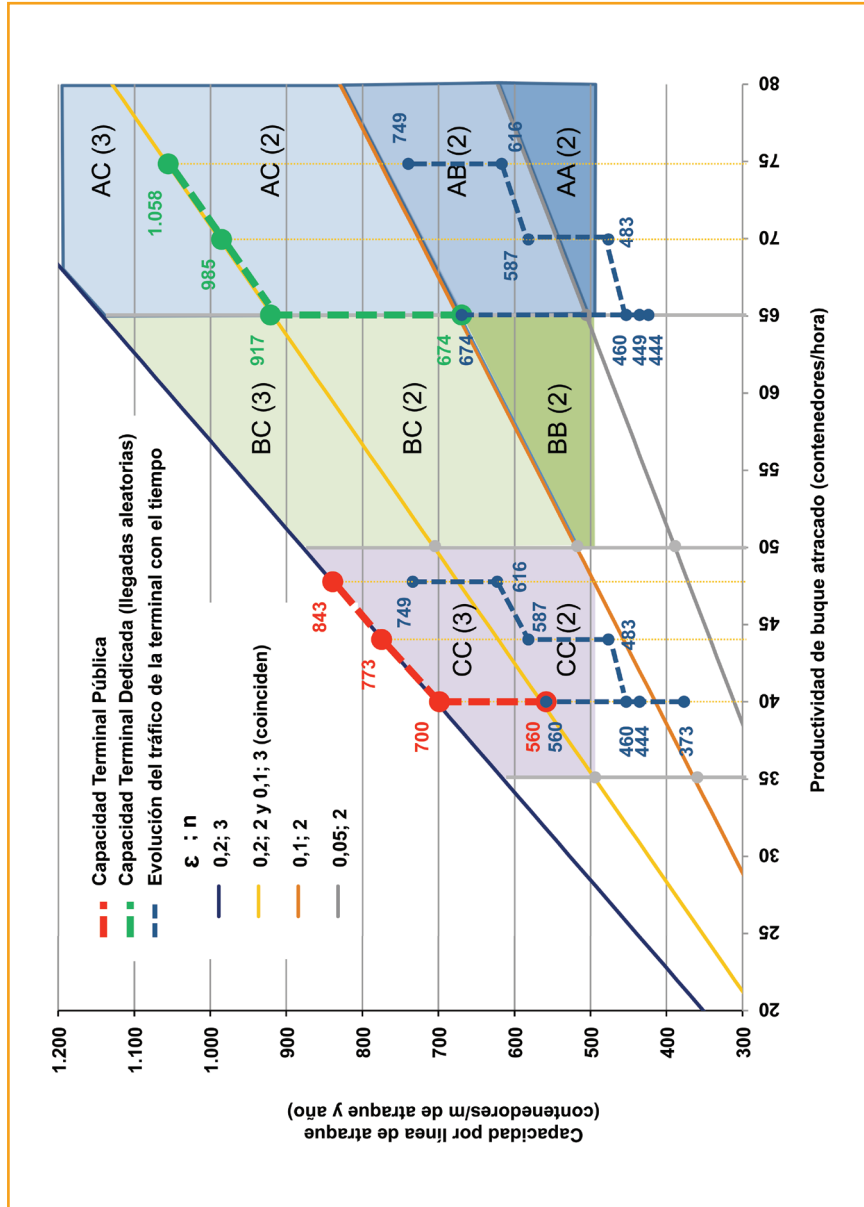
Fuente: Fundación Valenciaport

Como se ve en el Gráfico 16 para garantizar como mínimo un $NdS B$ cuando la TD se enfrenta a un escenario menos favorable en el que las llegadas son aleatorias (distribución tipo $M/E_4/n$), para que la calidad de servicio sea mejor o igual a 0,10 (línea continua azul), se observa que la Fase 2 será necesaria en el año 9,5 contado desde el inicio de la concesión. Ya con la Fase 2 en funcionamiento, la TD tendrá capacidad suficiente para satisfacer el tráfico previsto, incluso con una calidad de servicio mejor a 0,05.

Resumiendo, si la TD estudiada tiene una distribución de llegadas muy programadas ($E_2/E_4/n$), puede llevar a cabo una mejor organización de los servicios ofrecidos, y consecuentemente conseguir una mayor tasa de ocupación, por lo que, para una determinada calidad de servicio, alcanza mayores capacidades por línea de atraque que con una distribución de llegadas más aleatorias ($M/E_4/n$).

El siguiente Gráfico 17 representa cómo evoluciona la capacidad por la línea de atraque y el tráfico de ambas terminales respecto a los niveles de servicio definidos en el Capítulo 5 del presente Manual.

Gráfico 17. Evolución de la capacidad por línea de atraque de la TP y la TD respecto a los niveles de servicio ($M/E_i/n$)



Fuente: Fundación Valenciaport

6.3. Cálculo de capacidad de almacenamiento

Resolución de Cuestión 3

En principio, la resolución de esta cuestión no depende directamente de si la terminal es pública o dedicada, ya que la capacidad de almacenamiento es función del equipo de patio empleado como se muestra a continuación. Pero, el porcentaje de transbordo que exista en la terminal sí que influye en este cálculo. Normalmente el peso del transbordo es más importante en una terminal dedicada que en una pública, como ocurre en este caso según puntualiza el enunciado del problema.

Para el cálculo de la capacidad de almacenamiento de terminales de contenedores se utiliza la siguiente fórmula, especificada en el Apartado 5.4.2.2:

$$C_p = N^{\circ}Huellas_{TEU} \times h \times \frac{365}{T_a}$$

Sin embargo, para poder comparar esta capacidad de patio con la previsión de tráfico marítimo (fijada en el enunciado) o con la propia capacidad por línea de atraque, se debe tener en cuenta que el porcentaje de tráfico de transbordo afecta a la capacidad de patio equivalente por línea de atraque ($C_{p\ eq\ A}$) que debe considerar que los contenedores de transbordo se cuentan dos veces en la línea de atraque. Así, para un tiempo de estancia media de los contenedores en la terminal (T_o) es de 6 días, tanto para los contenedores o TEUs de origen/destino terrestre (O/D) como para los de transbordo (TB), se aplica la siguiente fórmula.

$$C_{p\ eq\ LA} = K_{PTB} \times C_p$$

donde K_{PTB} es:

$$K_{PTB} = \frac{200}{2 \times \% O/D + \% TB}$$

El enunciado determina que la terminal pública tiene un 15% de transbordo y la dedicada un 75%, con lo cual la capacidad de patio se ve incrementada por los siguientes coeficientes:

$$\text{TP: 15\% Tráfico de transbordo} \longrightarrow K_{PTB} = 1,081$$

$$\text{TD: 75\% Tráfico de transbordo} \longrightarrow K_{PTB} = 1,600$$

El resto de términos de la fórmula de capacidad son el número de huellas que caben en el patio de la terminal, que depende de la densidad superficial, y la altura media de apilado, ambos factores dependientes a su vez del tipo de equipo de almacenamiento. Lo más exacto sería, para el equipo elegido, dibujar las huellas de los contenedores sobre la planta de la propia terminal. Sin embargo, como se ha expuesto en el presente Manual de Capacidad Portuaria ya existen diversos estudios sobre esta temática que permiten calcular la capacidad de almacenamiento de una manera más sencilla y directa, gracias a los valores presentados en la Tabla 30 (Apartado 5.4.2.4).

La Tabla 30 muestra los rangos de densidades superficiales (Huellas_TEUs/ha) y la capacidad estática (D_p) (TEUs/ha – está ya internalizando la altura media de apilado h) en función del equipo de almacenamiento. Por tanto, teniendo definido el tamaño del patio de la terminal y utilizando estas recomendaciones, la capacidad anual de almacenamiento para cada uno de los equipos que se quiera considerar varía en función de los días de estancia de los contenedores en la terminal.

De acuerdo con la Tabla 30, se han tomado valores de la capacidad estática para un patio de RTGs (6 de ancho con 4+1 de altura de apilado) y para uno de *straddle carriers* (SC con 3+1 de altura de apilado) de 650 TEUs/ha y de 475 TEUs/ha, respectivamente, ambos valores se encuentran dentro de las recomendaciones.

Con estos datos se calculan las capacidades de almacenamiento para los dos sistemas de patio propuestos, tanto para la Fase 1 y la Fase 2, como se puede ver en la Tabla 40 y la Tabla 41.

Tabla 40. Capacidad de almacenamiento de la TP

Capacidad de almacenamiento de la TP de la Dársena Sur – Fase 1 y Fase 2				
T_a : Tiempo medio de estancia del contenedor (almacenamiento) = 6 días				
Terminal pública con 15% de transbordo, $K_{PTB} = 1,081$				
	SC		RTG	
	Fase 1	Fase 2	Fase 1	Fase 2
C_s : Capacidad estática (TEUs/ha)	475	475	650	650
A_p : Área de patio (ha)	18	27	18	27
C_p : Capacidad de Patio (TEUs/año)	520.125	780.187	711.750	1.067.625
$C_{P_{eqLA}}$ (TEUs/año)	562.297	843.445	769.459	1.154.189
Año ampliación (inicio Fase 2)	7,9		14,4	

Fuente: Fundación Valenciaport

Tabla 41. Capacidad de almacenamiento de la TD

Capacidad de almacenamiento de la TD de la Dársena Sur – Fase 1 y Fase 2				
T_a : Tiempo medio de estancia del contenedor (almacenamiento) = 6 días				
Terminal dedicada con 75% de transbordo, $K_{PTB} = 1,600$				
	SC		RTG	
	Fase 1	Fase 2	Fase 1	Fase 2
C_s : Capacidad estática (TEUs/ha)	475	475	650	650
A_p : Área de patio (ha)	18	27	18	27
C_p : Capacidad de Patio (TEUs/año)	520.125	780.187	711.750	1.067.625
$C_{P_{eqLA}}$ (TEUs/año)	832.200	1.248.299	1.138.800	1.708.200
Año ampliación (inicio Fase 2)	16,1		-	

Fuente: Fundación Valenciaport

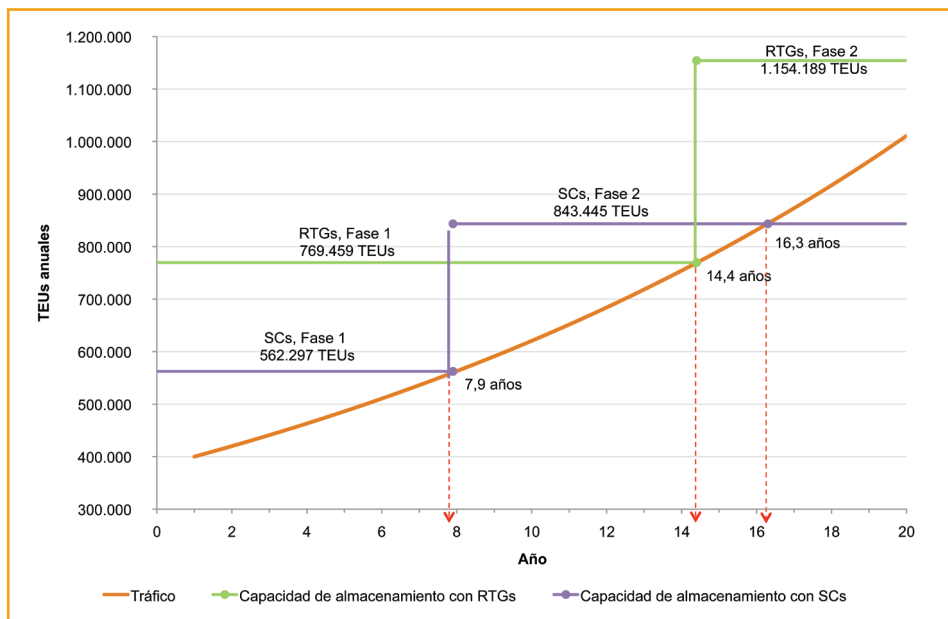
Como indican los resultados anteriores, y como parece lógico a partir de los valores de capacidad estática tomados para el cálculo, el patio de RTGs tiene mayor capacidad que el de SCs.

El Gráfico 18 muestra para la terminal pública con un 15% de transbordo, la capacidad de almacenamiento para RTGs y SCs junto con las previsiones de tráfico, lo que permite deducir cuando se debería realizar la ampliación en cada caso. De acuerdo con este, la Fase 2 sería necesaria seis años y medio antes en el caso de un patio de SCs.

Una terminal con patio de RTGs gestionada con un tiempo medio de estancia de los contenedores de 6 días, requerirá tener operativa la Fase 2 a partir de los 14,4 años para poder satisfacer las previsiones de tráfico durante toda la concesión.

En el caso de que se optase por un patio de SC, la Fase 2 sería necesaria a partir del año 7,9 y la capacidad de ésta se agotaría a los 16,3 años de concesión. Es decir, con SCs no sería posible satisfacer las previsiones de tráfico durante los últimos 5 años de concesión para la terminal pública. Por ello, el único equipo de patio válido para satisfacer la demanda de capacidad durante toda la concesión es el RTG.

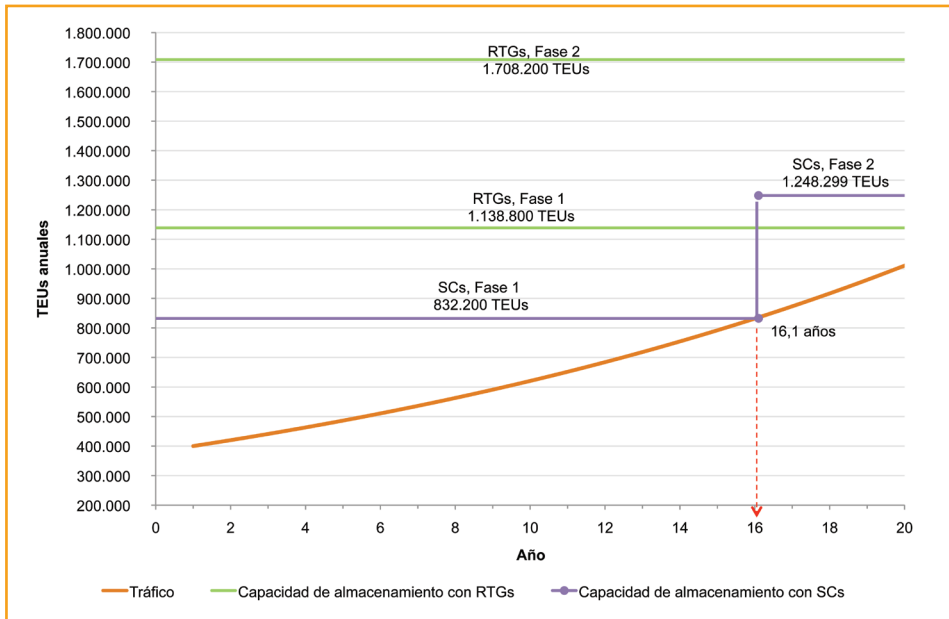
Gráfico 18. Comparación capacidades de almacenamiento para RTGs y SCs en la TP (15% de transbordo) con la previsión de tráfico



Fuente: Fundación Valenciaport

Para la terminal dedicada con un 75% de trasbordo, las capacidades de patio para ambos equipos son mucho mayores que para un 15% de trasbordo, como se ve en el Gráfico 19.

Gráfico 19. Comparación capacidades de almacenamiento para RTGs y SCs en la TD (75% de trasbordo) con la previsión de tráfico



Fuente: Fundación Valenciaport

En este caso, si el patio fuera de RTGs, no sería necesaria ejecutar la Fase 2, ya que la capacidad de patio superaría la previsión de tráfico a lo largo de toda la concesión.

Para el patio de SCs se necesitaría tener la ampliación terminada para los 16,1 años, pero esta vez la Fase 2 sí tendría capacidad para atender el tráfico previsto durante toda la concesión.

Al igual que en la terminal pública, para la terminal dedicada, a priori, y teniendo en cuenta exclusivamente la capacidad de patio, parece más conveniente utilizar un patio de RTGs ya que no precisaría ejecutar la Fase 2. Sin embargo, en el caso de que la línea de atraque de la TD requiriera por sí misma de la Fase 2, esta afirmación debería apoyarse sobre un estudio de viabilidad que analizase cuál de los dos equipos es más conveniente desde un punto de vista económico-financiero.

Asimismo, a la hora de decidir qué equipo utilizar deben considerarse escenarios menos favorables desde el punto de vista de la capacidad, como que el tráfico creciese más de lo previsto o que el porcentaje de transbordo se viese reducido. Por ello, para evitar que ante un cambio de las condiciones de la demanda el subsistema de almacenamiento llegue a convertirse en el limitante de la capacidad de la terminal, se recomienda elegir el equipo de patio que obtenga una capacidad de almacenamiento más próxima a la capacidad por línea de atraque.

Otra forma alternativa, más sencilla y directa, de saber cuál es el equipo más adecuado para atender las previsiones de tráfico es utilizar el Gráfico 11 y el Gráfico 12 del apartado de recomendaciones del presente Manual (5.4.2.4).

Por un lado, con el Gráfico 11, a partir de la capacidad estática para cada uno de los equipos elegidos (RTG: 650 TEUs/ha y SC: 475 TEUs/ha – siguiendo con los valores anteriormente tomados de la Tabla 30) y considerando $T_o = 6$ días, se obtiene cuál es la capacidad anual por hectárea de cada uno de los equipos. Multiplicando esta capacidad unitaria por hectárea por la superficie de patio (A_p) y por el K_{PTB} correspondiente (puesto que existe transbordo) se concluye que solamente el patio de RTGs es capaz de atender a las previsiones de tráfico (1 MTEUs). Las Tablas 42 y 43 recogen estos cálculos para la TP y la TD, respectivamente.

Tabla 42. Capacidad de almacenamiento de la TP – Gráfico 11

Capacidad de almacenamiento de la TP de la Dársena Sur – Fase 1 y Fase 2. Gráfico 11				
T_a : Tiempo medio de estancia del contenedor (almacenamiento) = 6 días				
Terminal pública con 15% de transbordo, $K_{PTB} = 1,081$				
	SC		RTG	
C_s (TEUs/ha)	475		650	
C_p (TEUs/ha y año) – Gráfico 11	29.000		40.000	
	Fase 1	Fase 2	Fase 1	Fase 2
A_p (ha)	18	27	18	27
C_p (TEUs por año)	522.000	783.000	720.000	1.080.000
$C_{P_{eq\alpha LA}}$ (TEUs por año)	564.324	846.486	778.278	1.167.568

Fuente: Fundación Valenciaport

Tabla 43. Capacidad de almacenamiento de la TD – Gráfico 11

Capacidad de almacenamiento de la TD de la Dársena Sur – Fase 1 y Fase 2. Gráfico 11				
T_a : Tiempo medio de estancia del contenedor (almacenamiento) = 6 días				
Terminal dedicada con 75% de transbordo, $K_{PTB} = 1,600$				
	SC		RTG	
C_s (TEUs/ha)	475		650	
C_p (TEUs/ha y año) – Gráfico 11	29.000		40.000	
	Fase 1	Fase 2	Fase 1	Fase 2
A_p (ha)	18	27	18	27
C_p (TEUs por año)	522.000	783.000	720.000	1.080.000
$C_{P_{eq\alpha LA}}$ (TEUs por año)	835.200	1.252.800	1.152.000	1.728.000

Fuente: Fundación Valenciaport

Por otro lado, el Gráfico 12 permite plantear el problema de manera inversa: calculando la necesidad de capacidad para posteriormente averiguar qué equipos de patio pueden satisfacerla. Así, una vez conocidos los días de estancia ($T_a = 6$ días) y calculando cuál es la necesidad de capacidad anual unitaria por hectárea a partir del tráfico previsto para el

año 20 de concesión ($\text{Tráfico año } 20/A_p = 1 \text{ MTEUs}/27 \text{ ha} = 37.000 \text{ TEUs/ha}$ aproximadamente) corregido (dividido) por el K_{PTB} de cada terminal, se obtiene la capacidad estática (C_s) mínima que el equipo de patio proporcionar; en el caso de la TP algo superior a 560 TEUs/ha, y en el de la TD del orden de 380 TEUs/ha. Volviendo a la Tabla 30 se deduce que el único equipo que cumple las necesidades de almacenamiento de la TP es el RTG (6 ancho y 4+1 de altura de apilado). En el caso de la TD, como se ha observado en el resto de alternativas de cálculo, aunque ambos equipos satisfacen la demanda para la Fase 2, el RTG es el único capaz de satisfacerla sin necesidad de la ampliación (equipo de patio con $D_p > 570 \text{ TEUs/ha}$).

Es importante resaltar que si alguna de las condiciones prefijadas se modifican, por ejemplo la altura de apilado (definida en la Tabla 30) o los días de estancia del contenedor en patio (dato del enunciado), así como el porcentaje de tráfico de transbordos, la capacidad anual del sistema cambia y por lo tanto la solución del problema será diferente. En la Tabla 44 puede verse cómo varía la capacidad de almacenamiento dependiendo de los días de estancia para los dos equipos considerados en la resolución del ejercicio, calculada mediante la fórmula presentada al principio del presente apartado y teniendo en cuenta el coeficiente de transbordos (K_{PTB}).

De acuerdo con los resultados de la Tabla 44, el sistema de SC en la terminal pública con la Fase 2, que en principio no tenía capacidad para atender el tráfico previsto en los últimos 5 años de concesión, tendría capacidad suficiente para satisfacer dicho tráfico durante todo el periodo de concesión si el tiempo medio de estancia de los contenedores fuese ligeramente superior a los 5 días.

Tabla 44. Capacidad de almacenamiento de la TP y la TD de la Dársena Sur en función de los días de estancia

Capacidad de almacenamiento de la Dársena Sur – Fase 2				
A_p : Área de patio = 27 ha				
C_s : Capacidad estática (TEUs/ha)	SC:		475	
	RTG:		650	
Tráfico previsto año 20 (TEUs)			1.010.780	
Días de estancia (T_a)	Capacidad anual (TEUs)			
	TP ($K_{PTB}=1,081$)		TD ($K_{PTB}=1,600$)	
	SC	RTG	SC	RTG
2	2.530.338	3.462.567	3.744.900	5.124.600
3	1.686.892	2.308.378	2.496.600	3.416.400
4	1.265.169	1.731.284	1.872.450	2.562.301
5	1.012.135	1.385.027	1.497.960	2.049.840
6	843.446	1.154.189	1.248.300	1.708.200
7	722.954	989.305	1.069.971	1.464.171
8	632.584	865.642	936.225	1.281.150
9	562.297	769.459	832.200	1.138.800
10	506.068	692.513	748.980	1.024.920

Fuente: Fundación Valenciaport

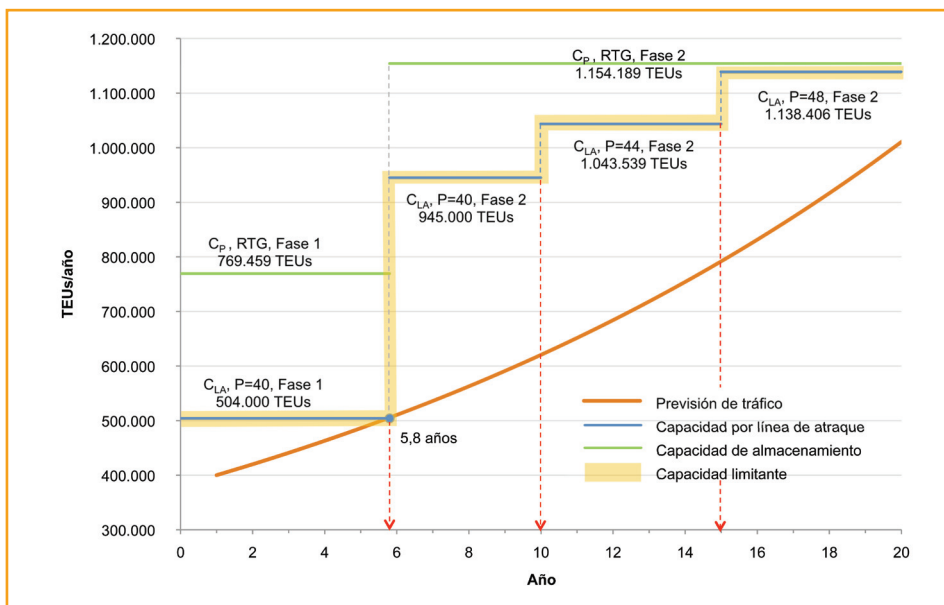
6.4. Capacidad limitante de la terminal

Resolución de Cuestión 4

De acuerdo con los resultados de capacidad por línea de atraque (C_{LA}) y de almacenamiento (C_p expresada en $C_{p\ eq\ LA}$), obtenidos en las cuestiones anteriores y teniendo en cuenta que el equipo de patio que se considera idóneo, tanto para la TP como para la TD, es el RTG (6 ancho; 4+1), la capacidad de las futuras terminales de la Dársena Sur del Puerto de Valle Verde es, para ambos casos, la menor de las capacidades de estos dos subsistemas, siempre teniendo en cuenta que el subsistema de recepción y entrega, y el de interconexión no deberían ser limitantes de la capacidad de la terminal.

El Gráfico 20 representa las capacidades limitantes por subsistemas para la terminal pública con patio de RTGs, para la calidad de servicio de 0,20 (límite superior de la espera relativa para el nivel de servicio C), a lo largo de los 20 años de concesión. El subsistema que limita la capacidad a lo largo de toda la concesión es la línea de atraque. Este subsistema determina que la Fase 2 debe estar operativa a los 5,8 años del inicio de la concesión. Pero, las ampliaciones en patio y atraque relativas a esta Fase 2 podrían realizarse en momentos diferentes, es decir, se podría realizar la ampliación del atraque en primer lugar (que es la necesaria a los 5,8 años), mientras que la de patio se podría diferir en el tiempo (para estar lista a los 15 años) para así ajustar la inversión a las necesidades.

Gráfico 20. Capacidad limitante en la TP para $T_d/T_s=0,20$

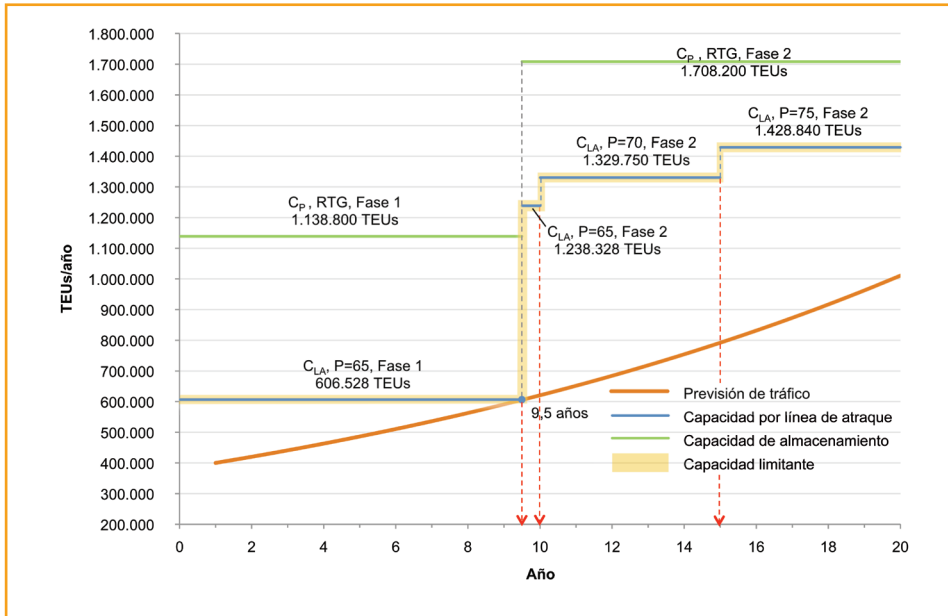


Fuente: Fundación Valenciaport

Para la terminal dedicada con patio de RTGs, las capacidades limitantes por subsistemas para la calidad de servicio 0,10 (límite superior de la espera relativa para el nivel de servicio B) y para una caracterización $M/E_4/n$ (el peor de los dos escenarios posibles)

se muestran en el Gráfico 21. Se observa que, como en el caso de la terminal pública, el sistema que determina cuándo poner en marcha la Fase 2 es la línea de atraque, en este caso a los 9,5 años. También se deduce de dicho gráfico que la capacidad de la terminal limita la línea de atraque durante toda la concesión.

Gráfico 21. Capacidad limitante en la TD ($M/E_4/n$) para $T_d/T_s=0,10$



Fuente: Fundación Valenciaport

Si la TD se caracterizase según un sistema $E_2/E_4/n$ (con llegadas muy programadas), de acuerdo con los cálculos representados en el Gráfico 15, la Fase I de la línea de atraque podría acomodar el tráfico previsto durante los 20 años de concesión. Planificando un patio de RTGs, la Fase I también garantiza la capacidad de almacenamiento necesaria, por lo que en este caso el concesionario no necesitaría implementar la Fase 2. No obstante, y aunque esta no se alcanzase durante el periodo de concesión, la capacidad limitante de la terminal sería 1.030.320 TEUs correspondientes a la capacidad por la línea de atraque (la menor de ambas).

La simulación ¿es un sustituto de la teoría o un sucedáneo del experimento?

Jorge Wagensberg, científico y divulgador

TINGLADO Nº 4



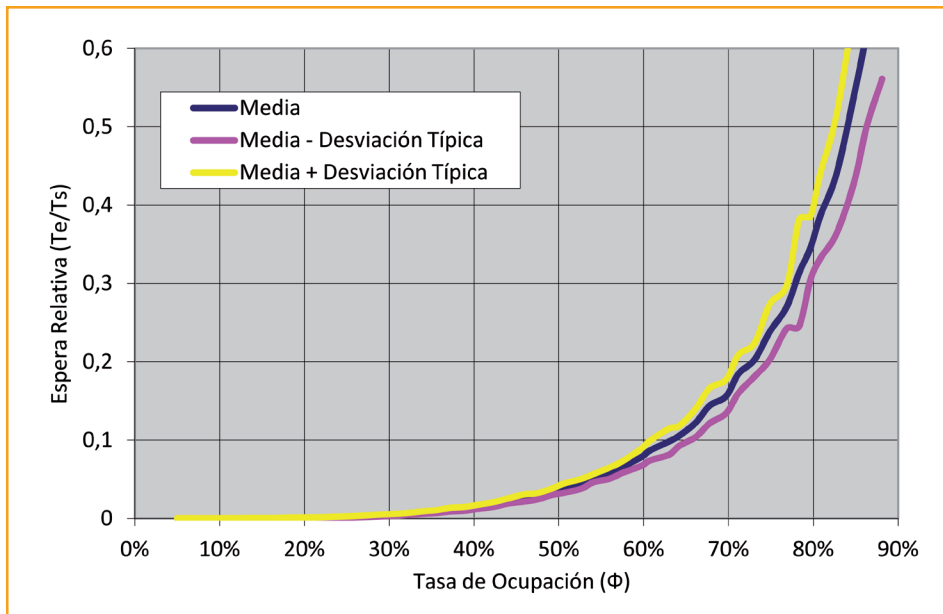
Anexo 1: Observaciones y limitaciones de la formulación de la capacidad por línea de atraque

En relación con la formulación de la capacidad por línea de atraque desarrollada en este Manual se pueden hacer las observaciones que siguen a continuación.

I. Variabilidad natural de la tasa de ocupación

Hay que hacer notar que definida una espera relativa (T_e/T_s), para las tasas de ocupación de muelle altas que pueden darse en muelles con un elevado número de atraques, la variabilidad natural de la tasa de ocupación no es despreciable (véase el caso para $n=5$ del Gráfico 22).

Gráfico 22. Variabilidad natural de la tasa de ocupación. El caso M/E₄/5



Fuente: Obrer-Marco y Aguilar (2011)

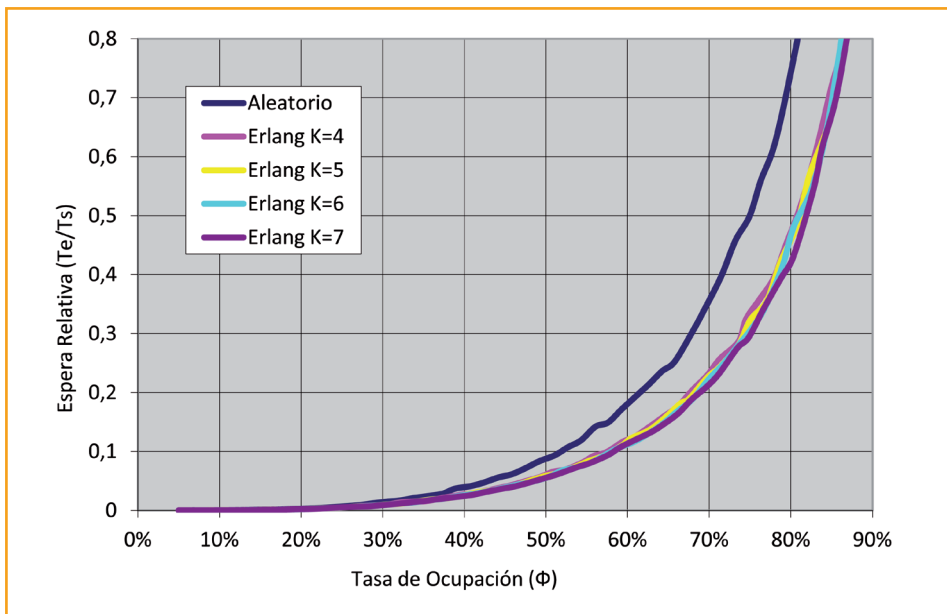
En el Gráfico 22 se puede ver cómo evoluciona la variabilidad natural al aumentar la tasa de ocupación para el sistema M/E₄/5. Las curvas de este gráfico se componen de 50 puntos, y cada punto se ha determinado mediante 25 simulaciones (25 años). En el gráfico se representa la media de los valores de dichas simulaciones, la media más la desviación típica y la media menos la desviación típica. Esta tendencia se presenta de forma similar en todas las distribuciones de intervalos entre llegadas, tiempos de servicio y para cualquier número de atraques que permita alcanzar tasas de ocupación de muelle altas.

Con ello se concluye que a medida que la tasa de ocupación crece, los valores calculados con base en los datos tomados en un solo año son progresivamente menos representativos, debiendo tomar periodos más largos de simulación para calcular las medias. Así, tanto la manifestación de repetidas crisis de congestión como la ausencia de ellas, no es suficiente para concluir que la situación está cerca del límite de la terminal o lejos de este límite, y habrá que simular durante largos periodos de tiempo para confirmar la situación de la que se trata.

2. Pérdida de importancia del grado (K) de la función Erlang en la distribución de tiempos de servicio

Cabe destacar que para un sistema $M/E_K/n$, existe muy poca variación en los resultados para valores de K iguales o superiores a 4. Como estos valores de K suelen ser frecuentes, para relacionar la espera relativa con la tasa de ocupación no sería imprescindible conocer la K de la función de densidad del tiempo de servicio, sino que solamente interesaría conocer que, en efecto, esta variable sigue una función de distribución Erlang de K mayor o igual a 4. En el Gráfico 23 se observa este solapamiento de las curvas $M/E_K/n$, en este caso calculado para 4 atraques y valores de K entre 4 y 7, mostrando también el caso de distribución de tiempos de servicio aleatoria ($M/M/n$) a efectos de comparación.

Gráfico 23. Superposición de curvas en los sistemas $M/E_K/4$, para K entre 4 y 7



Fuente: Obrer-Marco y Aguilar (2011)

3. Efecto de la modelización del atraque discreto frente al continuo

Para el desarrollo de la formulación de la capacidad se ha supuesto que el subsistema de carga y descarga de buques se compone de un número determinado de puestos de atraque idénticos (modelo discreto del muelle). Esta asunción parece poco discutible en algunas terminales portuarias, pero cuando se trata de grandes terminales de contenedores, la realidad es que la explotación de la línea de atraque no suele concebir el muelle de esta manera, sino más bien como una línea continua donde, en función de las esloras de los buques que en cada momento escalan en la terminal, el número de buques atracados varía.

A diferencia de un muelle modelado de forma discreta, en un muelle modelado de manera continua los buques entran en cola no porque el muelle esté completamente lleno, sino porque no caben en el espacio disponible en ese instante. Esto plantea dos aspectos a considerar:

- A efectos de optimizar la infraestructura es relevante la lógica de asignación del atraque, en especial en los episodios de congestión. Esta asignación puede ser simple, afectando sólo al espacio (decidiendo el lugar más adecuado para ubicar cada buque) o más compleja, afectando también al tiempo en el que se atraca, e incluso al orden de llegada (decidiendo cuándo debe atracar cada buque, y alterando o no el turno de llegada), todo ello con el objetivo de optimización. Es evidente –y así se comprueba– que, dependiendo de si se optimiza la asignación del atraque, se reducen o alargan los episodios de congestión, variando las esperas de los buques y con ello la capacidad del muelle así idealizado.
- En la idealización discreta del muelle, siempre que hay cola el muelle está ocupado al 100%. Por el contrario, en la idealización continua del muelle, ni en los peores momentos de congestión el muelle estará completamente ocupado. Ello implica que en el modelo continuo sean de esperar tasas de ocupación menores que en el modelo discreto. Por ello, antes que seguir con este discurso, la ecuación para calcular las tasas de ocupación debe de ser reescrita para adaptarse a la nueva situación.

En efecto, cuando el muelle se simula de manera discreta, se considera que el atraque está ocupado cuando en él se posiciona un buque, no reflejando si, en función de su eslo-

ra, ese buque ocupa el atraque completo o no. En este caso y para un periodo de tiempo determinado, Φ se obtiene de la siguiente manera:

$$\phi = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{t_{oi}}{t_{añoi}}}{n}$$

Donde,

- Φ : tasa de ocupación calculada de manera discreta
- i : contador de atraques
- n : número de atraques
- t_{oi} : horas que el atraque i está ocupado
- $t_{añoi}$: horas operativas del atraque i al año

Sin embargo, cuando el muelle se explota de manera continua, al no existir el concepto de “atraque”, se considera ocupado solamente el espacio que emplea el buque, al que se debe añadir el espaciado de resguardo, cuyo conjunto se puede valorar a partir del coeficiente de separación entre buques ($K_{Separación}$). Así, el valor de Φ_C para un periodo de tiempo determinado (generalmente un año) se puede obtener de la siguiente manera:

$$\phi_C = \sum_{j=1}^B \frac{K_{Separación} \cdot L_{Vj} \cdot t_{sj}}{L_{LA} \cdot t_{año}}$$

Donde:

- Φ_C : tasa de ocupación calculada de manera continua
- j : contador de los buques que hacen escala en la terminal durante el tiempo considerado
- B : número de buques que hacen escala en la terminal durante el tiempo considerado
- $K_{Separación}$: coeficiente que aplicado sobre la longitud del buque proporciona la distancia de seguridad entre buques (del orden de 1, 1)
- L_{Vj} : eslora del buque j
- t_{sj} : horas de servicio del buque j
- L_{LA} : longitud del muelle
- $t_{año}$: horas operativas del muelle al año

Si se desea comparar situaciones, estos dos conceptos de Φ se emplearán como si representaran lo mismo —y en cierta manera así es—, pero lo cierto es que se calculan mediante ecuaciones diferentes.

Además de lo expuesto, otros aspectos a considerar abren nuevas posibilidades a tener en cuenta. El primero es la necesidad implícita de que los buques se caractericen por su función de distribución de esloras, ya que no es evidente —sino más bien al contrario— que los resultados vayan a ser indiferentes si la distribución de esloras es, respecto de sus valores medios, muy dispersa o muy concentrada.

Por otra parte, si se intentan comparar los resultados de varios casos, idealizados cada uno de ellos de las dos maneras, discreta y continua, no sólo hay que cambiar la formulación de la tasas de ocupación, sino que hay que reflexionar también sobre el concepto de atraques equivalentes que emplea la formulación discreta. La principal dificultad que se plantea es la elección del “buque tipo”. La elección de este “buque tipo” define su eslora y proporciona el número de atraques equivalentes, a partir de la longitud del muelle y del resguardo de seguridad entre buques. Como la formulación de la capacidad por línea de atraque pretende dar un valor del tráfico en un periodo de tiempo durante el cual el número de buques atracados en el muelle no es constante, es preciso conocer la función de distribución de las esloras de los buques que hacen escala en la terminal. Si se trata de calcular el buque tipo para una terminal en proyecto, convendría estimar las posibles funciones de distribución de esloras. Como ya se mencionó, al obtener n_{equiv} como cociente entre la longitud del muelle y la eslora del buque tipo (corregida por cuestiones de seguridad), el resultado puede ser fraccionario. Nótese que cuando las esloras de los buques que hacen escala en la terminal varíen, lo que es habitual con el tiempo, el valor del número de atraques equivalentes también cambiará.

Como se vio en el Apartado 5.1.2, la relación entre Φ y T_e/T_s es conocida para valores enteros del número de atraques equivalentes; sin embargo, es muy probable que ese valor resulte ser fraccionario. Esto plantea un problema a la hora de obtener Φ pues debe justificarse qué curva se ha de emplear.

Con el objetivo de poder comparar las dos posibles modelizaciones de la línea de atraque, un estudio (Obrer-Marco y Aguilar, 2011) presenta comparaciones de una serie de muelles, modelados de las dos maneras, que atienden a una serie de distribuciones de

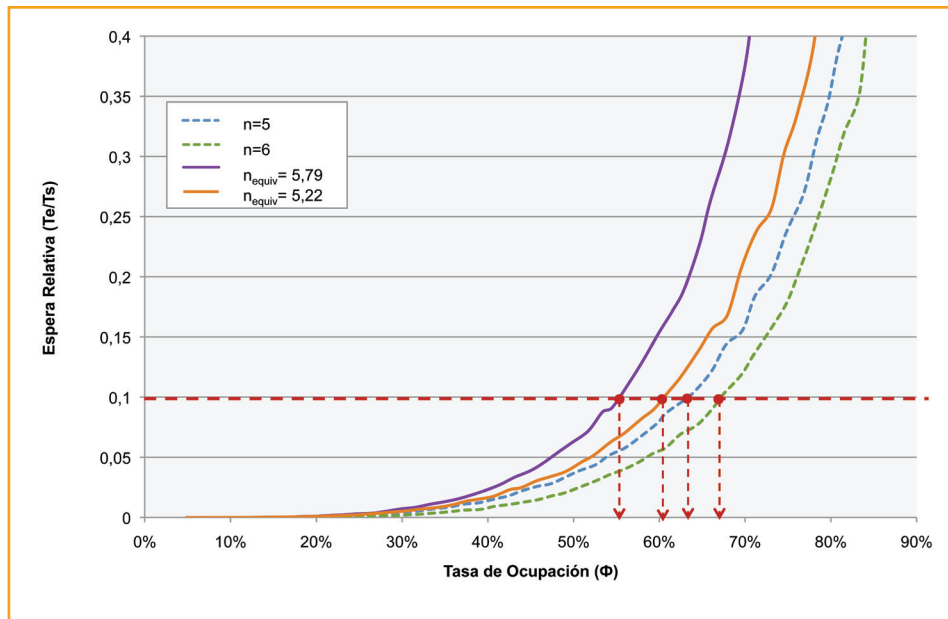
buques. Para resolver de una forma simple el problema de la lógica de asignación de muelle, en la modelización continua, el trabajo plantea la gestión de cola FIFO (no se altera el orden de llegadas) pero, como menciona Agerschou (2004), se realizan enmendadas de los buques atracados –desplazándolos de manera que no haya espacios perdidos entre ellos– cada vez que alguno abandona el atraque. Aunque esta práctica no se realice en la realidad, se puede admitir que proporciona un valor máximo de la tasa de ocupación. Los resultados arrojan diferencias entre ambas modelizaciones.

3.1. Diferencias cuando las esloras de los buques siguen una distribución constante

Cuando se simulan esloras constantes el impacto de la parte fraccionaria del número de atraques equivalentes es muy elevado, de manera que, cuanto mayor es, mayor diferencia existe entre los dos valores de la tasa de ocupación (el asociado al atraque explotado de manera continua y el asociado al muelle explotado de manera discreta compuesto por un número de atraques igual a la parte entera del anterior). A modo de ejemplo, en el Gráfico 24 se muestran los resultados de dos muelles explotados de manera continua a los que llegan buques de esloras constantes. En uno de ellos el número de atraques equivalentes es igual a 5,79, y en el otro es igual a 5,22. Como se puede apreciar, en este último caso la diferencia con relación a la curva de $n=5$ es muy inferior. En este y en todos los gráficos que siguen, las simulaciones discretas se dibujan en trazo discontinuo y las continuas con este mismo trazo continuo.

Este hecho se puede explicar por la diferencia en la definición de la tasa de ocupación entre el muelle explotado de manera discreta y continua, expuesta en este mismo punto. Los resultados anteriores muestran el efecto del desaprovechamiento del muelle cuando éste no es múltiplo de la eslora (constante en este caso), lo que conlleva la imposibilidad de que se alcance la asíntota en una tasa de ocupación igual a 1.

Gráfico 24. Correspondencia de las tasas de ocupación con la espera relativa de los sistemas $M/E_n/n$, para n entre 5 y 6, con esloras constantes



Fuente: Obrer-Marco y Aguilar (2011)

Así, cuando las esloras simuladas son constantes, si la parte fraccionaria del número de atraques equivalentes tiende a cero (5,1; 5,05;...), se aproximará con tasas de ocupación crecientes –por la izquierda– a los resultados de la simulación de un muelle compuesto por un número de atraques igual a la parte entera del número de atraques equivalentes anterior (5). En este proceso, la capacidad de la terminal no cambia. Esta aproximación creciente de las tasas de ocupación se produce porque corresponden a reducciones de la longitud del muelle de manera que ambos efectos se compensan.

Por el contrario, a medida que la parte fraccionaria del número de atraques equivalentes vaya aumentando (5,7; 5,8; 5,9;...), la curva se alejará hacia tasas de ocupación menores –hacia la izquierda– que las de la parte entera (5). Cuando el crecimiento del muelle sea tal que la parte entera aumente en una unidad, la curva se desplazará bruscamente hasta alcanzar la correspondiente al entero superior (6). Esta discontinuidad pone de manifiesto

un aumento brusco de la capacidad que sólo se produce justo en el momento en el que en el muelle cabe un barco más. Intuitivamente, la parte fraccionaria del número de atraques solo representa la longitud de muelle que no puede ser usada. Es decir, 6,8 atraques en el modelo discreto implican solo 6 atraques y 0,8 atraques sin uso. Así pues, a mayor parte fraccionaria del número de atraques, menor será la tasa de ocupación. Por lo que solo ampliar el muelle para pasar de 6,8 a 7 atraques, significaría un cambio de 7 frente a 6 atraques, lo cual es una gran diferencia.

3.2. Diferencias cuando las esloras de los buques tienen variabilidad

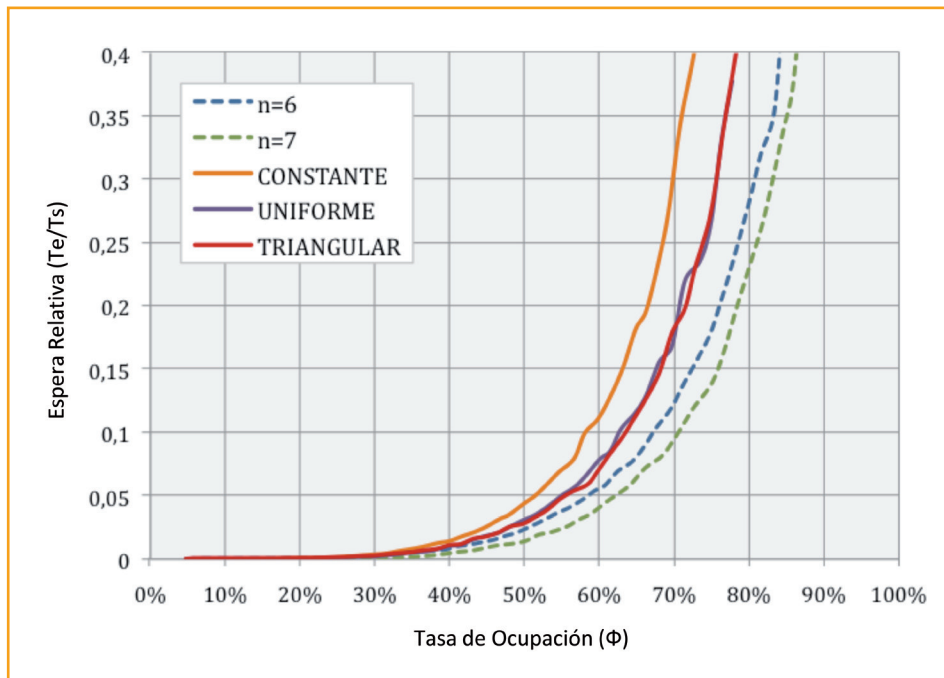
Según este mismo estudio, la variabilidad de esloras puede mejorar o empeorar el valor de la tasa de ocupación para la misma espera relativa en relación con el caso en el que las esloras son constantes (mejorar equivale a valores más altos de Φ_c , mientras que empeorar equivale a valores más bajos de Φ_c). Se ha comprobado que cuando la parte fraccionaria del número de atraques equivalente es mayor de 0,5 se produce una mejora, cuando es menor de 0,5 se produce un empeoramiento, y cuando está alrededor de 0,5 no existen diferencias sustanciales.

Con el fin de ilustrar estos resultados, en el siguiente Gráfico 25 y Gráfico 26 se muestran, respectivamente, ejemplos de los posibles supuestos de mejora o empeoramiento de las tasas de ocupación.

En el Gráfico 25 se presentan los resultados de la simulación de un muelle de 2000 metros de longitud donde atracan buques cuya eslora media es de 250 metros. Se han representado las curvas de tasa de ocupación $-T_e/T_s-$ para el caso en el que el muelle se explota de manera continua en tres situaciones: 1) las esloras siguen una distribución constante; 2) las esloras siguen una distribución uniforme de desviación máxima +/-100 metros; y 3) las esloras siguen una distribución triangular de desviación máxima +/-100 metros. Asumiendo un coeficiente de resguardo de 0,15, el número de atraques equivalentes es igual a 6,95. Con el fin de poder comparar con los resultados de la simulación discreta, también se han representado los resultados de los muelles compuestos por 6 y 7 atraques. Como se puede apreciar, las curvas asociadas a simulaciones con variabilidad de esloras (distribuciones uniformes o triangulares) se quedan a la derecha de las asociadas a la simulación con esloras constantes, lo que supone **mejoras de las tasas de ocupación** para el mismo valor de T_e/T_s . Esto implica también que la variabilidad de esloras proporciona resultados más próximos a aquellos obtenidos cuando se simula el muelle de manera discreta.

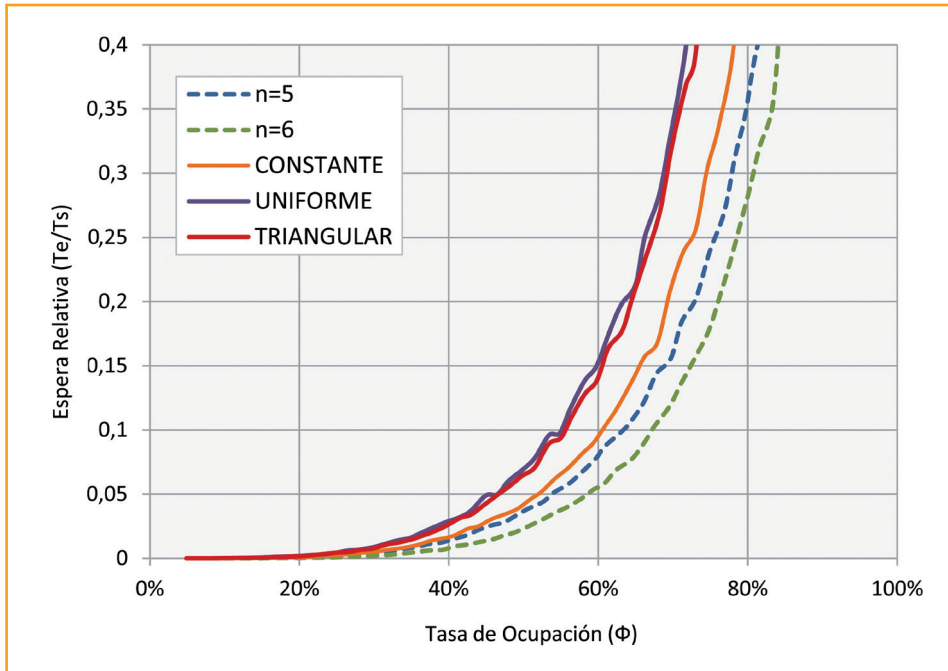
En el Gráfico 26 se presentan los resultados de la simulación de un muelle de 1.500 metros de longitud donde atracan buques cuya eslora media es de 250 metros, por lo que asumiendo el mismo resguardo entre buques que en el caso anterior, el número de atraques equivalentes es igual a 5,22. En este caso las curvas asociadas a simulaciones con variabilidad de esloras (distribuciones uniformes o triangulares) se quedan a la izquierda de las asociadas a la simulación con esloras que siguen una distribución constante, lo que supone menores valores de Φ_c para el mismo valor de T_e/T_s . En este gráfico se ve que hay notables diferencias entre que exista variabilidad (distribución uniforme o triangular) o no (distribución constante), pero una vez existe variabilidad poco importa si es de tipo concentrado (triangular) o repartido (uniforme). Por lo tanto, se observa que la variabilidad de esloras proporciona resultados **peores de tasas de ocupación**, y además más alejados de aquellos obtenidos cuando se simula el muelle de manera discreta.

Gráfico 25. Mejora de las tasas de ocupación



Fuente: Obrer-Marco y Aguilar (2011)

Gráfico 26. Empeoramiento de las tasas de ocupación



Fuente: Obrer-Marco y Aguilar (2011)

Por último, se ha podido comprobar en el mismo trabajo, que cuando la parte fraccionaria del número de atraques equivalentes está en torno a 0,5, la variabilidad de esloras no afecta a los resultados puesto que prácticamente se superponen las curvas correspondientes a distribuciones de esloras uniforme y triangular, con la correspondiente distribución constante.

En general, el incremento de tamaño de la línea de atraque, aumenta la capacidad de este subsistema, resultado de la modelación discreta, por vía doble: aumento del número de atraques y mejora de la tasa de ocupación. En el caso continuo, resulta obvio que a más tamaño, mayor capacidad (aunque dicho incremento a veces pueda ser casi nulo), si bien como se ha visto la contribución de la tasa de ocupación es mucho menos directa.


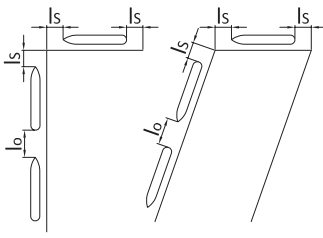
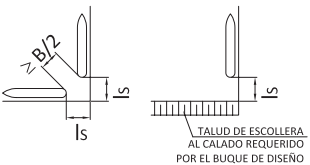
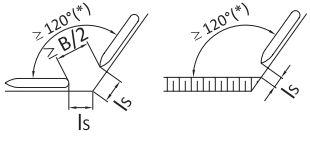
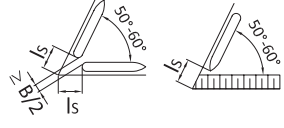
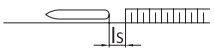
Estas comparaciones denotan las diferencias que aparecen al modelar el muelle de forma discreta o continua; diferencias que pueden ser aún mayores pues conviene recordar que para el cálculo del modelado continuo se ha asumido que en el muelle se llevan a cabo enmendadas sistemáticamente. Dichas diferencias sugieren la conveniencia de realizar los estudios de capacidad mediante modelización continua, muy en especial cuando de lo que se trata es de valorar el efecto de pequeñas ampliaciones del muelle, cuyo efecto resulta casi imposible de cuantificar mediante la modelización discreta.

De todo lo anterior se deduce la conveniencia de que, cuando el número de atraques que se obtenga sea fraccionario, en la fórmula de la capacidad se emplee la parte entera del mismo, y la tasa de ocupación a utilizar sea la de la curva correspondiente a este mismo número entero. En todo caso, es desaconsejable que se interpolen valores entre las curvas correspondientes a los enteros superior e inferior a dicho a valor, pues se estaría sobreestimando la capacidad. Sea como sea, es posible conocer con mayor profundidad el caso concreto del que se trate realizando las simulaciones correspondientes.



Anexo 2: Resguardos en planta en la línea de atraque

La siguiente tabla reproduce la propuesta de la ROM 2.1 “Obras de Atraque y Amarre” (González-Herrero et al., 2006) para el cálculo de los resguardos en planta en la línea de atraque.

ESQUEMA REPRESENTATIVO DEL MUELLE	VALORES DE LAS VARIABLES EN FUNCIÓN DE LA ESLORA TOTAL (L en m) DEL BARCO MAYOR QUE AFECTA A LA DETERMINACIÓN DE LA DIMENSIÓN ANALIZADA				
	MAYOR DE 300	300 – 201	200 – 151	150 – 100	MENOR DE 100 (1)
<p>1.- DISTANCIA "lo" ENTRE BARCOS ATRACADOS EN LA MISMA ALINEACIÓN (m)</p> 	30	25	20	15	10
<p>2.- SEPARACIÓN "ls" ENTRE BARCO Y CAMBIOS DE ALINEACIÓN O DE TIPOLOGÍA ESTRUCTURAL (m)</p> <p>a)</p> 	30	25	20	10	5
<p>b)</p> 	45/40	30	25	20	15
<p>c)</p> 	30/25	20	15	15	10
<p>d)</p> 	- /60	50	40	30	20
<p>e)</p> 	20	15	15	10	10

(1) PARA BUQUES CON ESLORA TOTAL MENOR DE 12m SE TOMARÁ COMO VALOR DE "lo" EL 20% DE "L", REAJUSTÁNDOSE LOS DEMÁS VALORES PROPORCIONALMENTE.

(B) MANGA DEL BARCO MAYOR QUE AFECTE A LA DETERMINACIÓN DE LA DIMENSIÓN ANALIZADA.

(*) EL ÁNGULO SE ENTENDERÁ LIMITADO A 160°. PARA ÁNGULOS MAYORES SE APLICARÁ EL 1.

Fuente: González-Herrero et al. (2006)

Anexo 3. Capacidad anual por metro de línea de atraque para atraques de 250 y 350 metros

En este Anexo se presenta la estimación de la capacidad anual en número de contenedores por metro de línea de atraque en función del tipo de tráfico ($M/E_4/n$ y $E_2/E_4/n$), de la productividad anual media de buque atracado (P) y del número de puestos de atraque (n), para terminales que tengan longitud de cada atraque de 250 metros (Tabla 45 y respectivos gráficos) y 350 metros (Tabla 46 y respectivos gráficos). Considerando para cada caso tres calidades de servicio asociadas a la espera relativa (T_e/T_s): 5%, 10% y 20%.

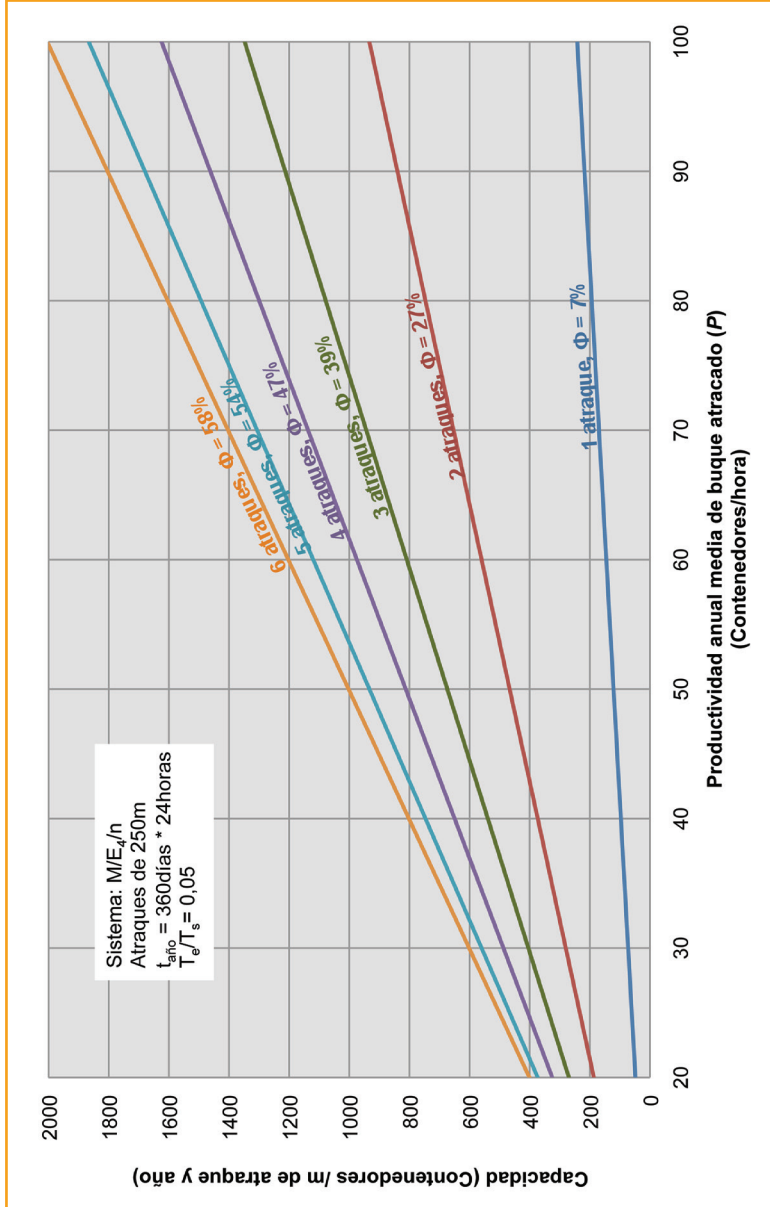
Tabla 4.5. Capacidad anual por metro de línea de atraque en función del tipo de tráfico, de la productividad anual media de buque atracado y del número de atraques – para atraques de 250 metros de longitud

CAPACIDAD POR LÍNEA DE ATRAQUE - TERMINAL CONTENEDORES (Contenedores / metro línea de atraque y año) Longitud de cada de atraque= 250 m; $t_{0,66} = 8.640$ h Calidad de servicio: $T_e/T_s = 0,05 - 0,10 - 0,20$										
Sistema y Caracterización del tráfico	Productividad media buque atracado (P) (Cont./h)	1	2	3	4	5	6			
E _i /E _n Escalas muy programadas	80	605 - 855 - 1.185	1.185 - 1.465 - 1.740	1.465 - 1.740 - 1.990	1.685 - 1.935 - 2.155	1.825 - 2.015 - 2.235	1.905 - 2.125 - 2.320			
	70	530 - 750 - 1.040	1.040 - 1.280 - 1.520	1.280 - 1.520 - 1.740	1.475 - 1.690 - 1.885	1.595 - 1.765 - 1.960	1.665 - 1.863 - 2.030			
	60	455 - 640 - 890	890 - 1.095 - 1.305	1.095 - 1.305 - 1.490	1.265 - 1.450 - 1.615	1.365 - 1.510 - 1.800	1.430 - 1.595 - 1.740			
	50	380 - 535 - 740	740 - 915 - 1.085	915 - 1.085 - 1.245	1.050 - 1.210 - 1.345	1.140 - 1.260 - 1.400	1.190 - 1.330 - 1.450			
M/E _n Llegadas aleatorias	70	165 - 335 - 580	650 - 870 - 1.185	940 - 1.185 - 1.475	1.135 - 1.375 - 1.645	1.305 - 1.520 - 1.765	1.400 - 1.620 - 1.835			
	60	145 - 290 - 495	560 - 745 - 1.015	805 - 1.015 - 1.265	975 - 1.180 - 1.410	1.120 - 1.305 - 1.510	1.200 - 1.385 - 1.575			
	50	120 - 240 - 415	465 - 620 - 845	670 - 845 - 1.050	810 - 985 - 1.175	930 - 1.085 - 1.260	1.000 - 1.155 - 1.310			
Nº Atraques (n)		1	2	3	4	5	6			

Fuente: Fundación Valenciaport

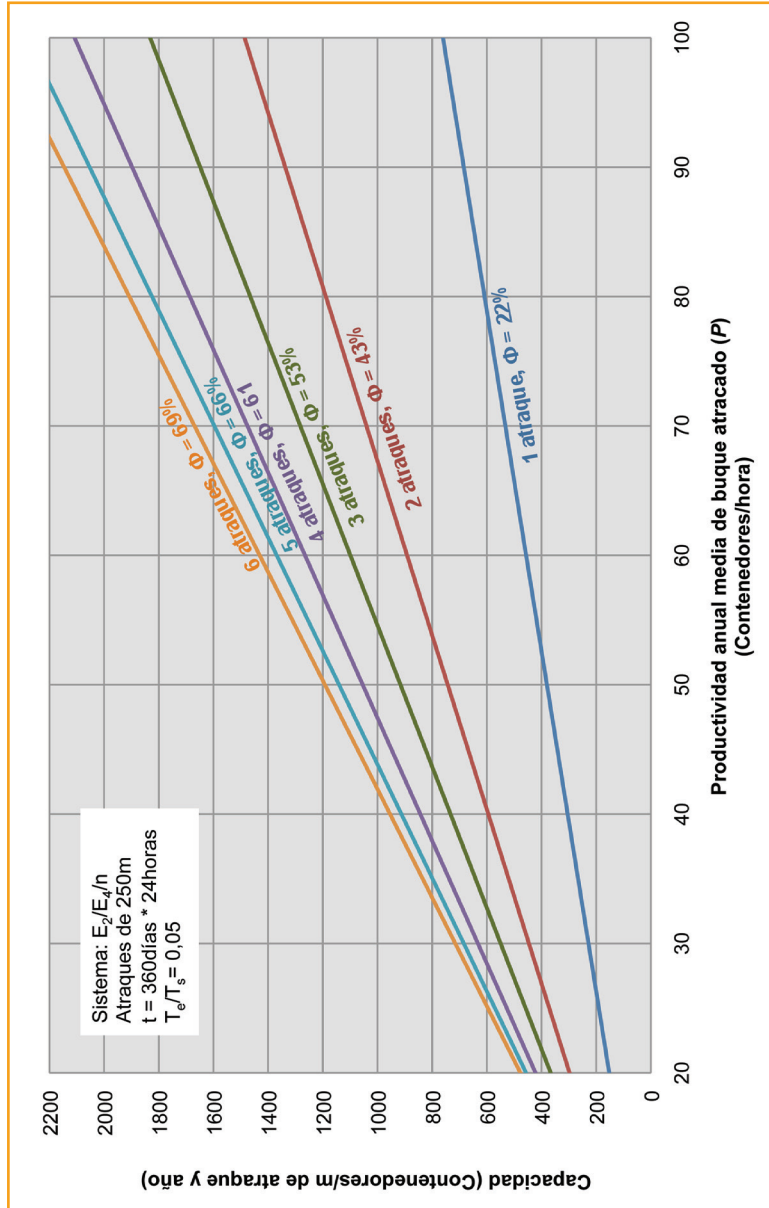
Capacidad anual por metro de línea de atraque para atraques de 250 y 350 metros

Gráfico 27. Capacidad anual por línea de atraque de un sistema $M/E_4/h$ y espera relativa de 0,05 para atraques de 250m



Fuente: Fundación Valenciaport

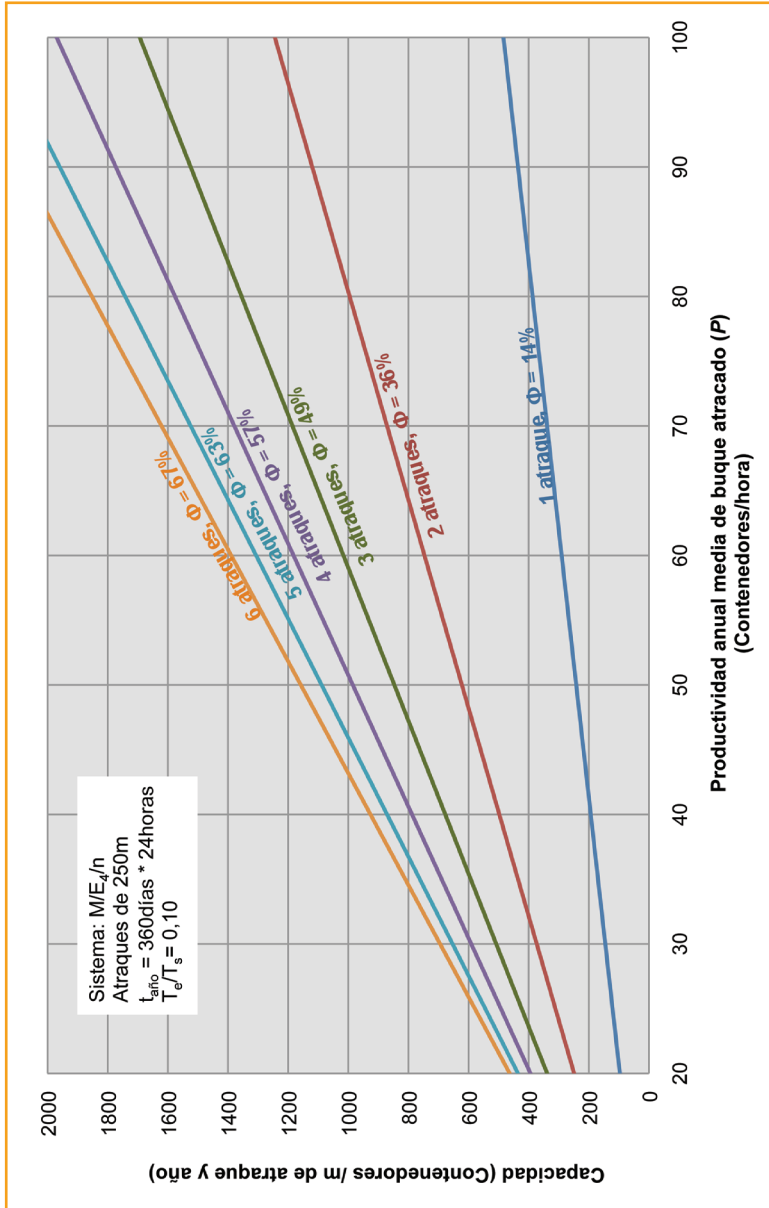
Gráfico 28. Capacidad anual por línea de atraque de un sistema $E_2/E_4/n$ y espera relativa de 0,05 para atraques de 250m



Fuente: Fundación Valenciaport

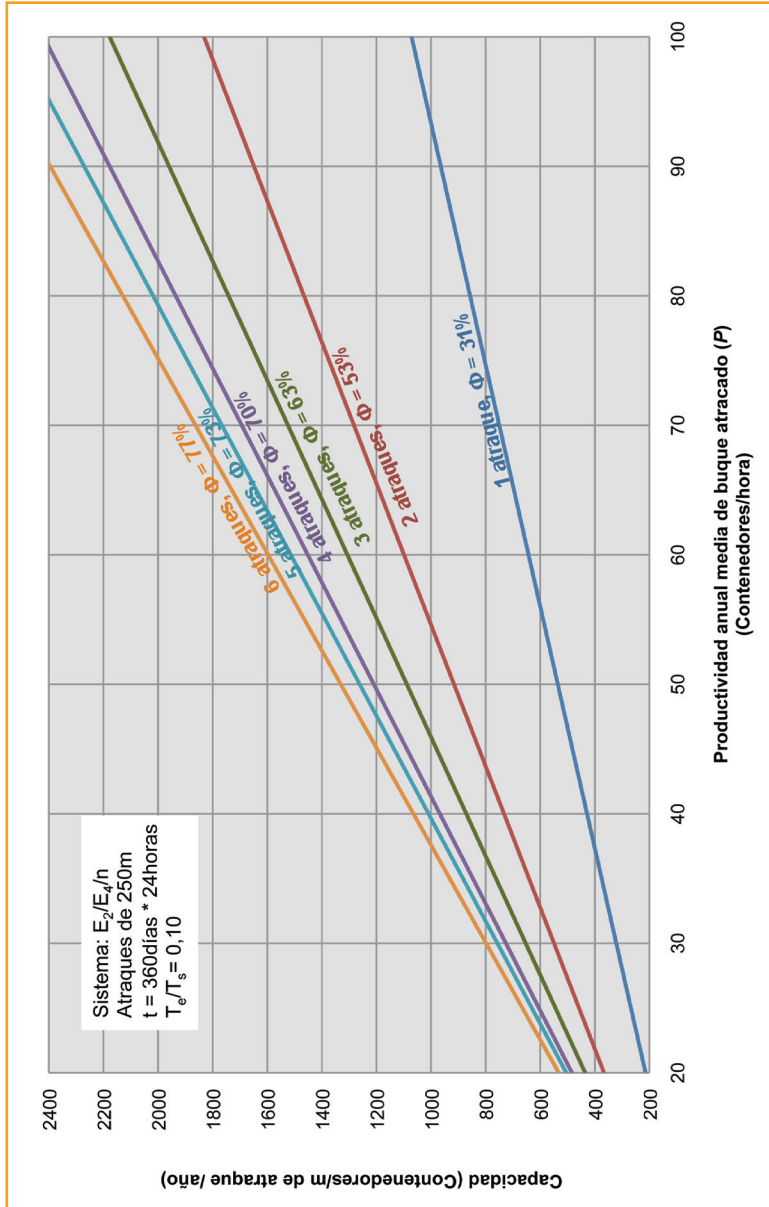
Capacidad anual por metro de línea de atraque para atraques de 250 y 350 metros

Gráfico 29. Capacidad anual por línea de atraque de un sistema $M/E_4/n$ y espera relativa de 0,10 para atraques de 250m



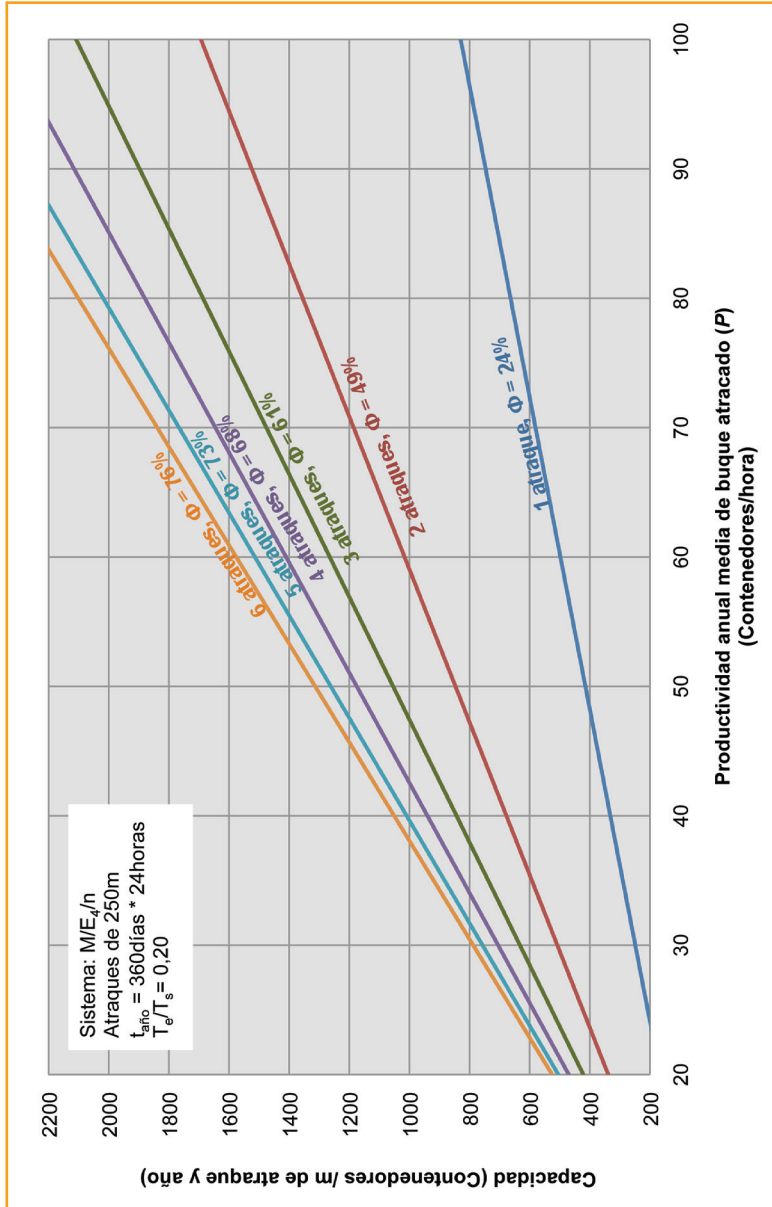
Fuente: Fundación Valenciaport

Gráfico 30. Capacidad anual por línea de atraque de un sistema $E_2/E_4/n$ y espera relativa de 0,10 para atraques de 250m



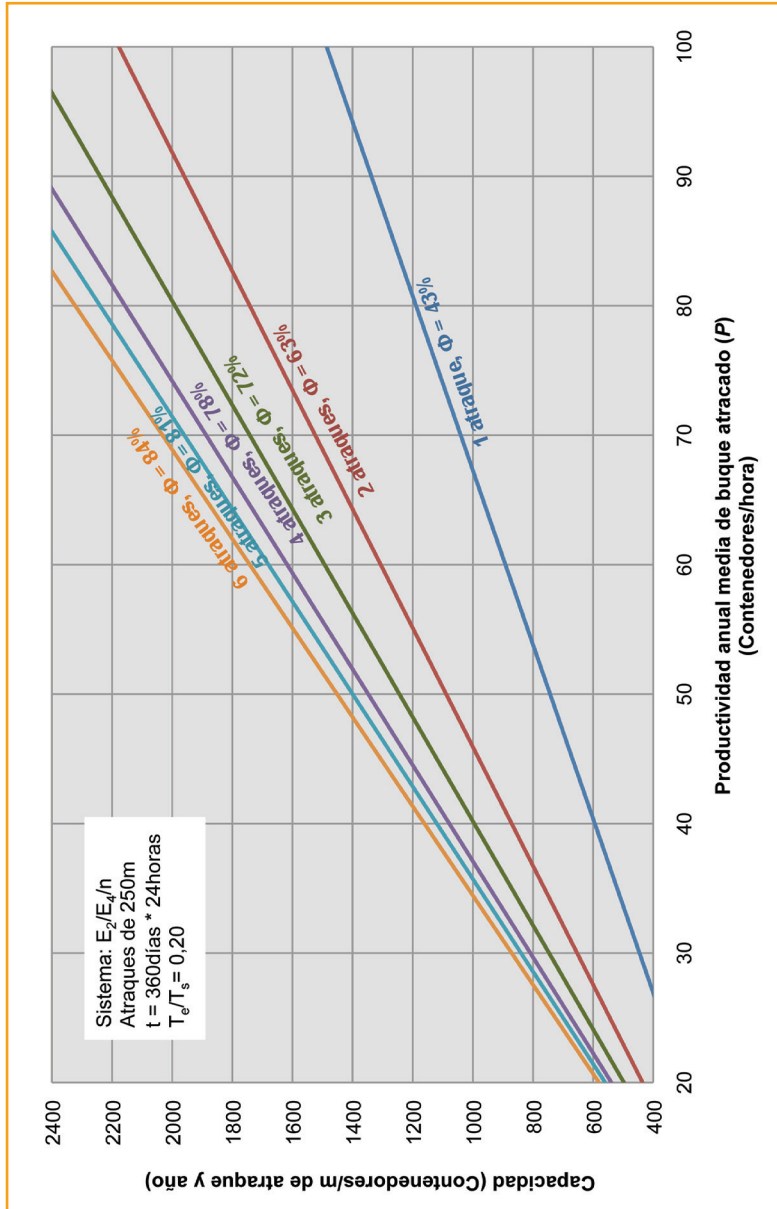
Fuente: Fundación Valenciaport

Gráfico 31. Capacidad anual por línea de atraque de un sistema $M/E_4/n$ y espera relativa de 0,20 para atraques de 250m



Fuente: Fundación Valenciaport

Gráfico 32. Capacidad anual por línea de atraque de un sistema $E_2/E_1/n$ y espera relativa de 0,20 para atraques de 250m



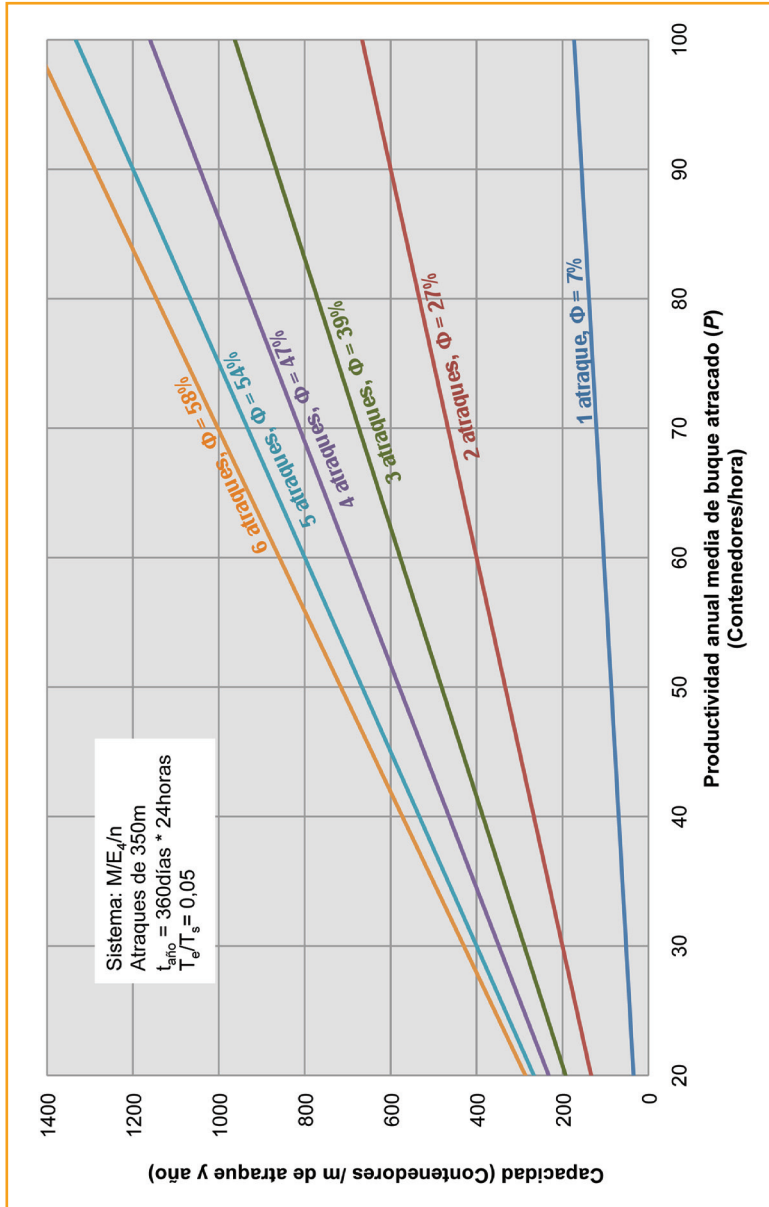
Fuente: Fundación Valenciaport

Tabla 46. Capacidad anual por metro de línea de atraque en función del tipo de tráfico, de la productividad anual media de buque atracado y del número de atraques – para atraques de 350 metros de longitud

Sistema y Caracterización del tráfico	Productividad media buque atracado (P) (Cont./h)	CAPACIDAD POR LÍNEA DE ATRAQUE - TERMINAL CONTENEDORES (Contenedores / metro línea de atraque y año) Longitud de cada de atraque= 350 m; $t_{atq} = 8.640$ h Calidad de servicio: $T/T_s = 0,05 - 0,10 - 0,20$					
		1	2	3	4	5	6
E/E /n Escalas muy programadas	80	430 - 610 - 845	845 - 1.045 - 1.240	1.045 - 1.240 - 1.420	1.205 - 1.380 - 1.540	1.300 - 1.440 - 1.600	1.360 - 1.520 - 1.655
	70	380 - 535 - 740	740 - 915 - 1.085	915 - 1.085 - 1.240	1.050 - 1.210 - 1.345	1.140 - 1.261 - 1.400	1.190 - 1.330 - 1.450
	60	325 - 455 - 635	635 - 785 - 930	785 - 930 - 1.065	900 - 1.035 - 1.155	975 - 1.080 - 1.200	1.020 - 1.140 - 1.240
	50	270 - 380 - 530	530 - 650 - 775	650 - 775 - 885	750 - 860 - 960	815 - 900 - 1.000	850 - 950 - 1.035
	70	120 - 240 - 415	465 - 620 - 845	670 - 845 - 1.050	810 - 985 - 1.175	930 - 1.085 - 1.260	1.000 - 1.155 - 1.310
M/E /n Llegadas aleatorias	60	100 - 205 - 355	400 - 530 - 735	575 - 725 - 900	695 - 840 - 1.005	800 - 930 - 1.080	855 - 990 - 1.125
	50	85 - 170 - 295	330 - 440 - 605	480 - 605 - 750	580 - 700 - 835	665 - 775 - 900	715 - 825 - 935
	40	65 - 135 - 235	265 - 355 - 480	385 - 480 - 600	460 - 560 - 670	530 - 620 - 720	570 - 660 - 750
Nº Atraques (n)	1	2	3	4	5	6	

Fuente: Fundación Valenciaport

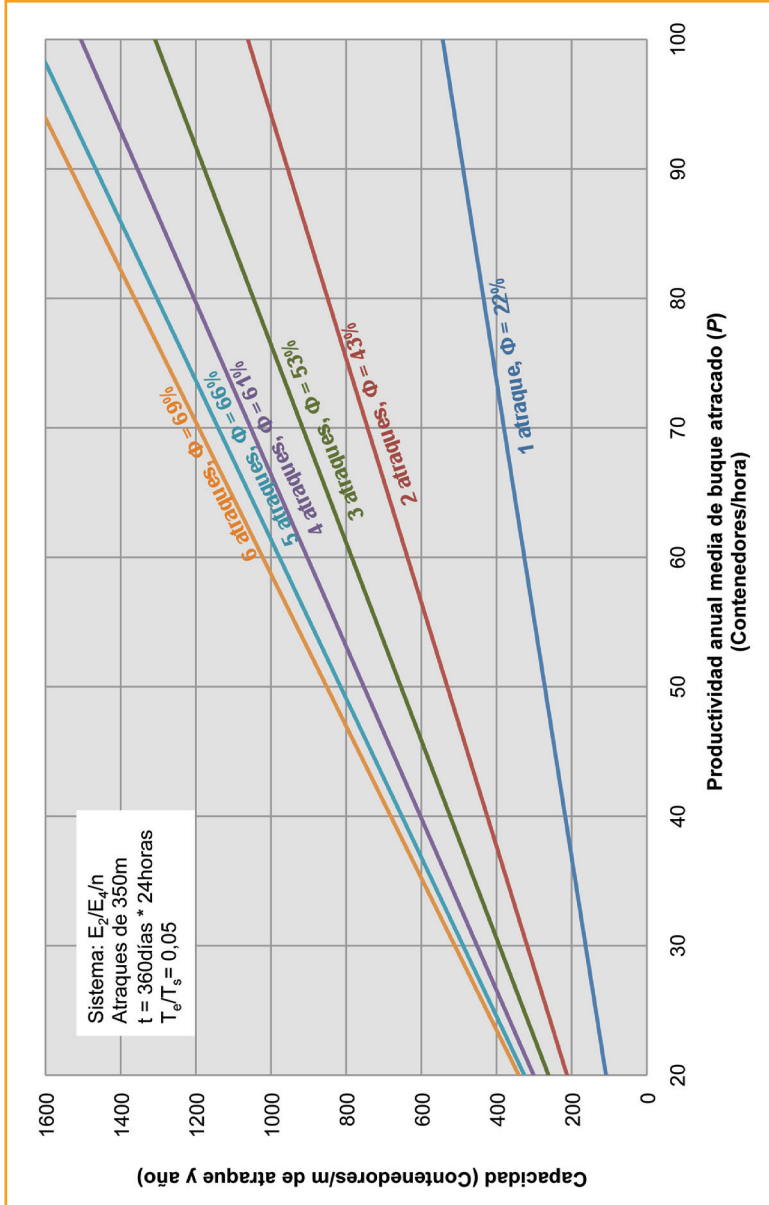
Gráfico 33. Capacidad anual por línea de atraque de un sistema $M/E_s/n$ y espera relativa de 0,05 para atraques de 350m



Fuente: Fundación Valenciaport

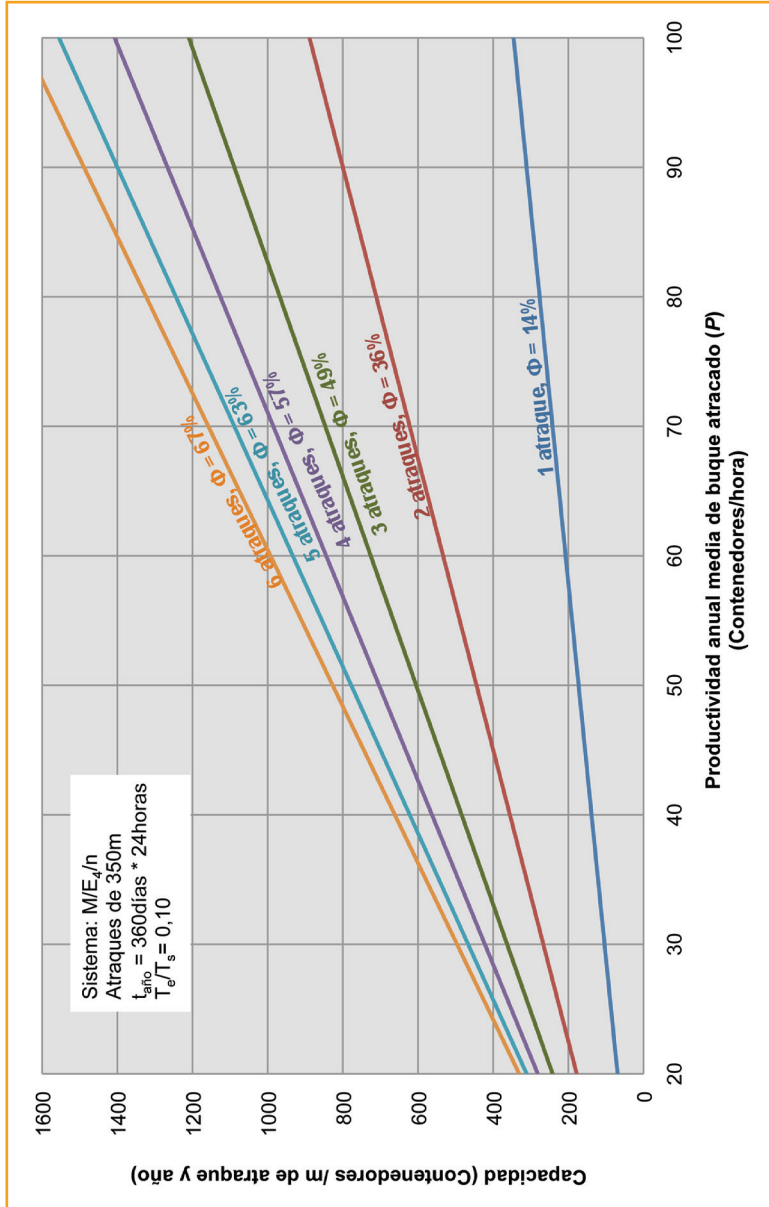
Capacidad anual por metro de línea de atraque para atraques de 250 y 350 metros

Gráfico 34. Capacidad anual por línea de atraque de un sistema $E_z/E_s/n$ y espera relativa de 0,05 para atraques de 350m



Fuente: Fundación Valenciaport

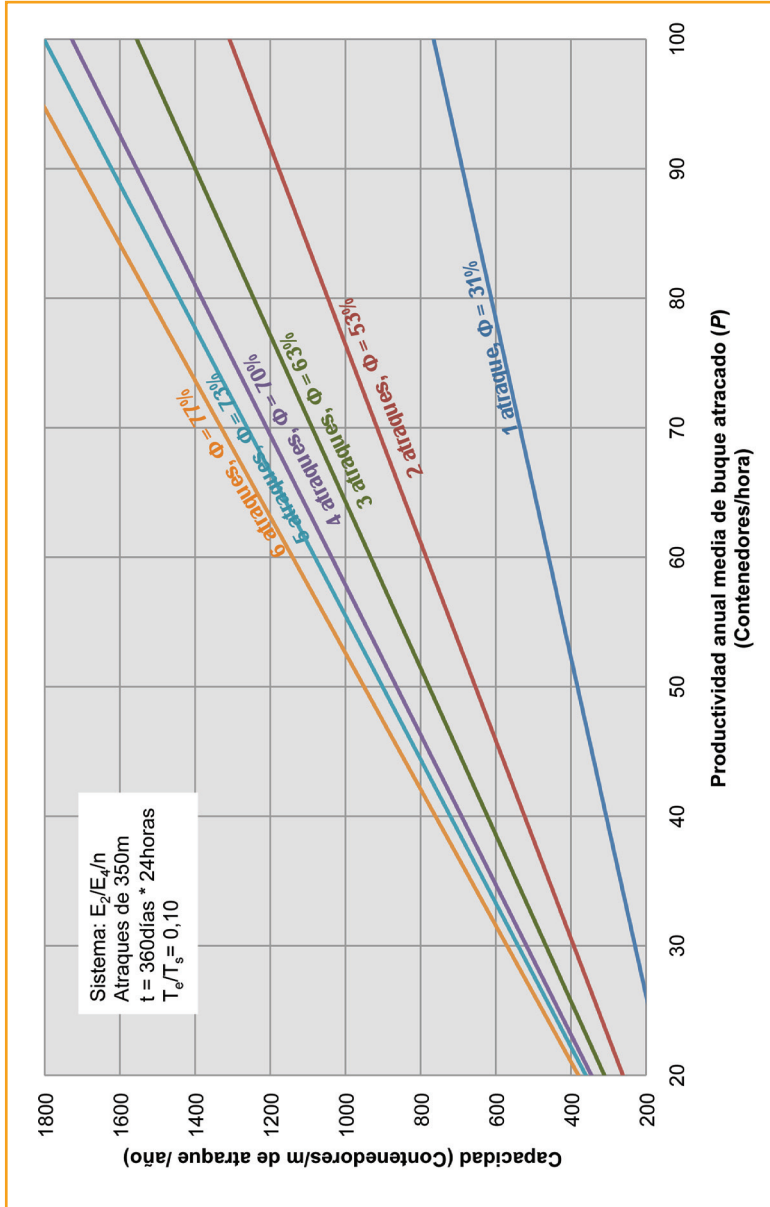
Gráfico 35. Capacidad anual por línea de atraque de un sistema $M/E_4/n$ y espera relativa de 0,10 para atraques de 350m



Fuente: Fundación Valenciaport

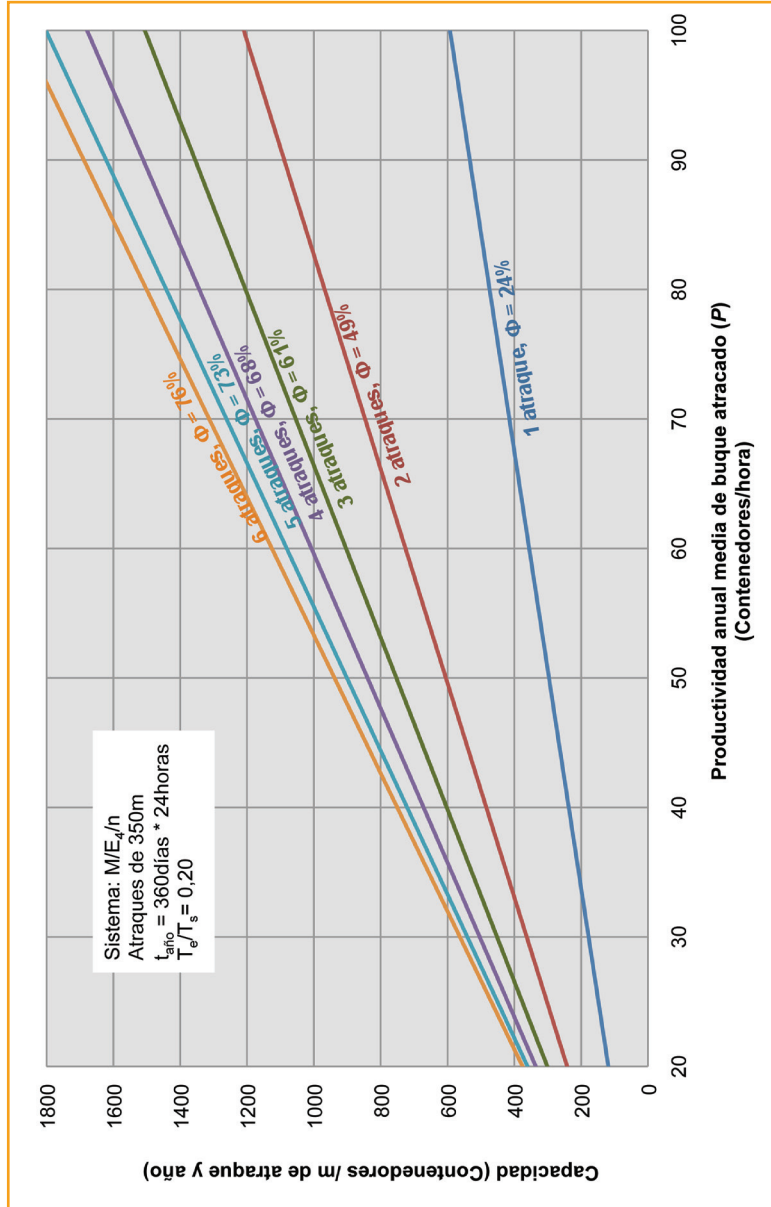
Capacidad anual por metro de línea de atraque para atraques de 250 y 350 metros

Gráfico 36. Capacidad anual por línea de atraque de un sistema $E_2/E_4/h$ y espera relativa de 0,10 para atraques de 350m



Fuente: Fundación Valenciaport

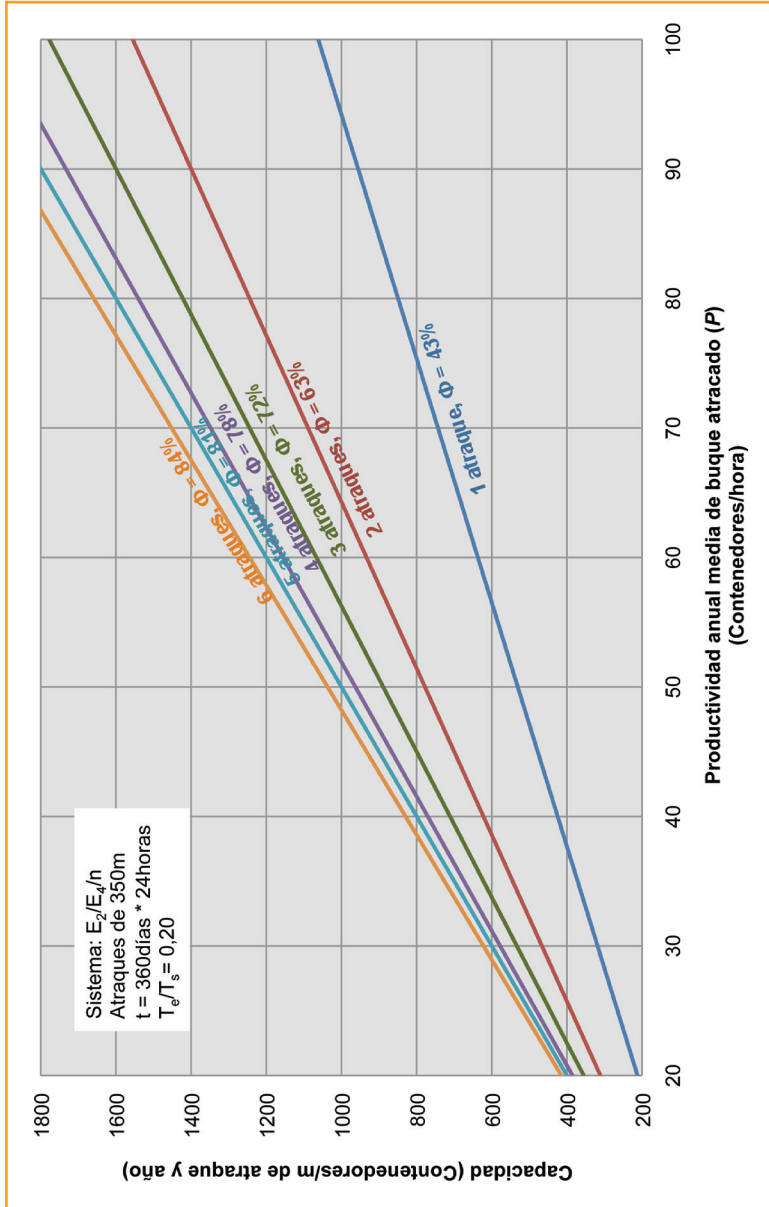
Gráfico 37. Capacidad anual por línea de atraque de un sistema $M/E_4/n$ y espera relativa de 0,20 para atraques de 350m



Fuente: Fundación Valenciaport

Capacidad anual por metro de línea de atraque para atraques de 250 y 350 metros

Gráfico 38. Capacidad anual por línea de atraque de un sistema $E_2/E_4/n$ y espera relativa de 0,20 para atraques de 350m



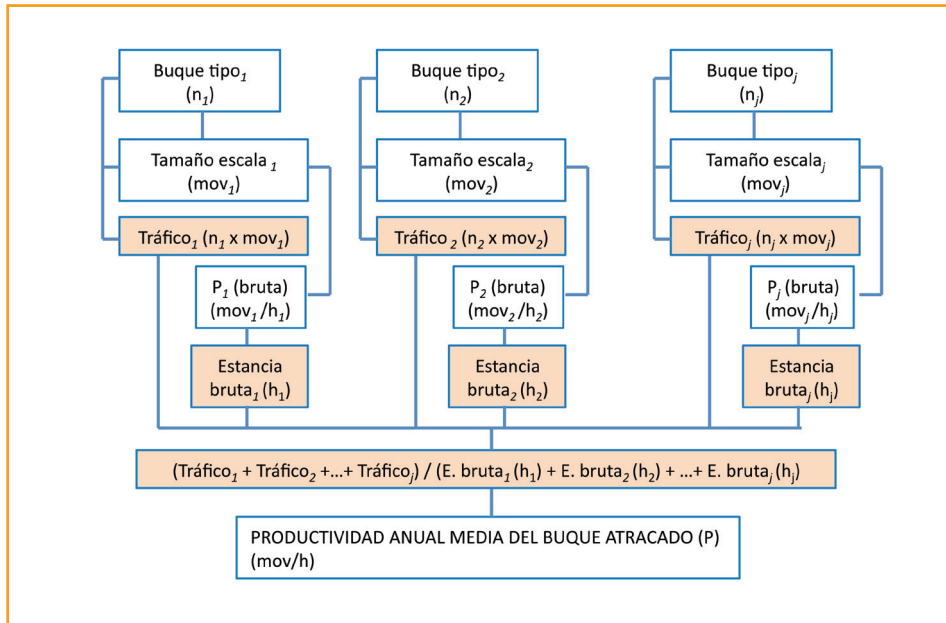
Fuente: Fundación Valenciaport

Anexo 4. Estimación de la productividad anual media de buque atracado

En el cálculo de la capacidad por línea de atraque de la terminal, la estimación de la productividad anual media de buque atracado (P) resulta relevante ya que, para un sistema de distribución de llegadas y de tiempos de servicio, un número de atraques y un valor de espera relativa, ambas variables son proporcionales.

El rango de valores a considerar para P está relacionado con los escenarios contemplados en el ejercicio de previsión de tráfico de buques. Estos escenarios se concretan en distribuciones de buques de distintas capacidades (tipos de buque) y tamaños de las escalas (movimientos de contenedores O/D terrestre y de transbordo) a lo largo de una anualidad; y, en las productividades (mov_i/h_i) para cada tipo o categoría de buque (véase Figura 58). Estas últimas son, principalmente, función del número de movimientos a realizar, del número medio de grúas empleado y de la productividad por grúa.

Figura 58. Cálculo de la productividad anual media de buque atracado (P)

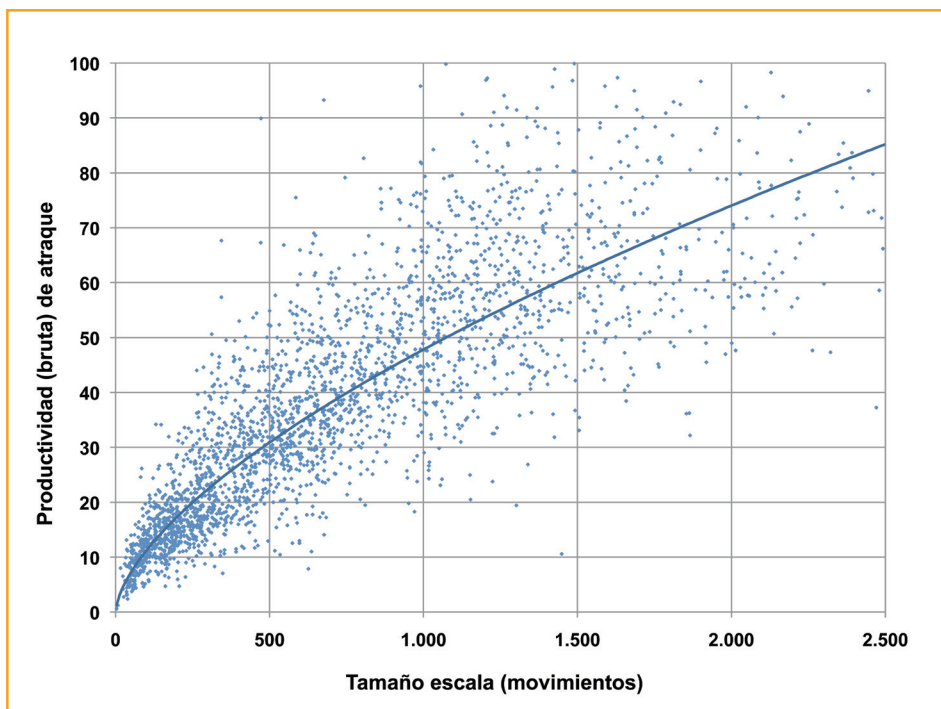


Fuente: Fundación Valenciaport

Por otro lado, como puede contrastarse en el Gráfico 39, la productividad de buque atracado está relacionada con el tamaño de la escala (movimientos de contenedores O/D terrestre y de transbordo), de modo que se incrementa según crece el número de movimientos a realizar. Es fundamentalmente el resultado de que a mayor número de movimientos es posible el empleo de más grúas de manera simultánea, lo que está alineado con el objetivo de minimizar el tiempo de estancia del buque operando en el atraque.

Resulta evidente que si el tamaño medio de las escalas es bajo, también lo será la productividad alcanzable; y, que los movimientos masivos facilitan elevadas productividades, como en el caso de las terminales dedicadas. En muchas terminales, el incremento histórico de la productividad anual media de buque atracado, y consecuentemente de la capacidad, se ha producido en paralelo al crecimiento del tamaño medio de las escalas, o dicho de otro modo, el tráfico ha venido creciendo y el número de buques lo ha hecho a menor ritmo o se ha estabilizado.

Gráfico 39. Relación entre el número de movimientos y la productividad (bruta) de atraque de los buques (muestra del Puerto de Valencia, año 2010)



Fuente: Fundación Valenciaport a partir de datos de la APV

A modo de ejemplo, en la Tabla 47 se muestra un caso del cálculo de la P , basado en los valores de Stenvert y Penfold (2004) recogidos en la Tabla 21 del Capítulo 5 que se somborean en morado y azul.

Tabla 47. Ejemplo de cálculo de la productividad anual media de buque atracado (P)

Datos: sistema M/E₄/4

Calidad = 0,10 supone tasa de ocupación = 57%

Para alcanzar una capacidad de 1.500 .000 TEUs, la P necesaria es de 50 cont./h

Ocupación	Capacidad buque (TEUs)	Buques (n)	Tamaño escala (mov)	Tráfico (mov)	P atraque (mov./h)	Tiempo atraque bruto (h)	horas/año
	4.400	492	1.067	524.800	44	11.808	8.640
	5.200	190	1.261	239.515	53	4.560	8.640
	6.200	115	1.503	172.848	63	2.760	8.640
	6.200	30	2.104	63.127	88	720	8.640
	8.800	0	2.987	0	124	0	
57%		827	cont. total	1.000.291	50	19.848	34.560
			TEUs total	1.500.436	P		
			4 atraques de 300 m		Línea atraque	1.200 m	
					Productividad por LA	834 cont./m	
					TEUs/cont.	1,5	
						1.250 TEUs/m	

Fuente: Fundación Valenciaport a partir de valores de Stenvert and Penfold (2004)

En la Tabla 48 se puede consultar el resultado de aplicar la metodología presentada en el Manual para calcular la productividad anual media de buque atracado en las terminales tipo empleadas por Ashar (2009), a partir del valor de productividad por línea de atraque presentado por el autor, para los casos de terminales públicas (Sistema M/E₄/n) y dedicadas (E₂/E₄/n y M/E₄/n).

Estimación de la productividad anual media de buque atracado

Tabla 48. Cálculo de la productividad anual media de buque atracado (P) para las terminales tipo de Ashar (2009) a partir de la productividad por línea de atraque

Ashar (2009)							
Tipo de atraque	Buque de diseño (TEUs)	Longitud Atraque (m)	Puestos atraque (n) (Ud)	Longitud L. atraque (m)	Capacidad		
					Atraque (TEUs)	Terminal (TEUs)	Línea atraque (TEUS/m año)
Sub Panamax	3.000	250	3	750	350.000	1.050.000	1.400
Panamax	4.500	280	3	840	450.000	1.350.000	1.607
Post Panamax I	5.700	300	3	900	500.100	1.500.300	1.667
Panamax	4.500	280	4	1.120	495.000	1.980.000	1.768
Post Panamax I	5.700	300	4	1.200	550.000	2.200.000	1.833
Post Panamax II	8.000	350	4	1.400	700.000	2.800.000	2.000
Post Panamax III	12.000	400	4	1.600	1.000.000	4.000.000	2.500

Manual de capacidad portuaria (Fundación Valenciaport, 2011)									
Tipo de atraque	Capacidad anual L. atraque (TEUs/m)				Productividad de atraque: P (cont./h)				
	Dedicada		Dedicada o Pública		Dedicada		Dedicada o Pública		Rango
	$E_2/E_4/n$		$M/E_4/n$		$E_2/E_4/n$		$M/E_4/n$		Varios
	0,05	0,1	0,1	0,2	0,05	0,1	0,1	0,2	
Sub Panamax	1.401	1.404	1.422	1.423	51	43	56	45	43-56
Panamax	1.619	1.609	1.610	1.609	66	57	71	57	57-71
Post Panamax I	1.671	1.687	1.672	1.687	73	62	79	64	62-79
Panamax	1.779	1.782	1.768	1.794	63	55	67	57	55-67
Post Panamax I	1.845	1.845	1.847	1.851	70	61	75	63	61-75
Post Panamax II	2.010	2.022	2.005	2.014	89	78	95	80	78-95
Post Panamax III	2.510	2.517	2.512	2.512	127	111	136	114	111-136

Fuente: Fundación Valenciaport a partir de valores de Ashar (2009)

En la Tabla 49 se plantea la comparación entre los valores manejados por Drewry (2002 y 2010) y Ashar (2009), empleando los resultados de la Tabla 48 y calculando los correspondientes a los casos de 2 y 3 atraques que entran en el rango de 500 a 1.000 metros de línea de atraque que maneja Drewry (ver Tabla 19 del Capítulo 5). El planteamiento permite, de nuevo, deducir las P empleadas de manera inversa. En el bloque superior de la tabla se compara la propuesta de Drewry de 1.000 TEUs/m para terminales públicas con competencia y menores tasas de ocupación (menor espera relativa) con el rango equivalente de Ashar entre 1.400 y 1.667 TEUs/m. Si se recuerda que el paso de una terminal de 2 a 3 atraques conlleva un aumento “automático” de la capacidad del 36% (para distribución $M/E_4/n$) se explica gran parte de la diferencia entre los resultados; esto es,

*Manual de capacidad portuaria:
aplicación a terminales de contenedores*

en el rango 500-1.000 metros de línea de atraque se sitúan los casos de 2 y 3 atraques, situándose la propuesta de Drewry de 1.000 TEUs/m en un valor medio que sobreestima el caso de 2 atraques y queda corta en el caso de 3 atraques.

En el segundo bloque, alrededor del valor de 1.200 TEUs/m, también se produce la referida sobreestimación e infraestimación comentadas, si bien en este caso la diferencia en relación con los valores de Ashar para 3 atraques, se reduce ya que la comparación se toma para una espera relativa de 0,20 (Drewry la identifica como el escenario de terminal pública con mayor tasa de ocupación de muelle).

Por último, en el tercer bloque, ahora alrededor de 1.600 TEUs/m, los resultados de la P son del mismo orden de magnitud en ambos autores llegando a ser del mismo valor, P = 66 contenedores /hora, en el caso de Sistema E₂/E₄/3 y espera relativa de 0,05.

Tabla 49. Cálculo de la productividad media de buque atracado (P) del rango 500-1.000 de Drewry (2002 y 2010) para las terminales tipo de Ashar (2009) y comparación

Drewry (2002 y 2010)						Manual de capacidad (FV, 2011)													
						Productividad de atraque: P (cont./h)						Comparación							
						Drewry			Ashar (2009)			% Ashar > Drewry							
Tipo de atraque	Buque de diseño (TEUs)	Longitud Atraque (m)	Puestos atraque (Ud)	Longitud L. atraque (m)	Capacidad L. atraque (TEUs/m)	Pública	Dedicada	Rango	Pública	Dedicada	Pública	Dedicada	Pública	Dedicada					
						M/E ₄ /n	E ₂ /E ₄ /n	Varios	M/E ₄ /n	E ₂ /E ₄ /n	M/E ₄ /n	E ₂ /E ₄ /n	M/E ₄ /n	E ₂ /E ₄ /n					
						0,1	0,2	0,05	0,1	0,1	0,2	0,05	0,1	0,1	0,2	0,05	0,1		
Sub Panamax	3.000	250	2	500	1.000	54		40-60											
Panamax	4.500	280	2	560		60													
Post Panamax I	5.700	300	2	600		65													
Sub Panamax	3.000	250	3	750		40				56			40%						
Panamax	4.500	280	3	840		45				71			58%						
Post Panamax I	5.700	300	3	900		48				79			65%						
Sub Panamax	3.000	250	2	500	1.200	48		38-78											
Panamax	4.500	280	2	560		53													
Post Panamax I	5.700	300	2	600		78													
Sub Panamax	3.000	250	3	750		38				45			18%						
Panamax	4.500	280	3	840		43				57			33%						
Post Panamax I	5.700	300	3	900		46				64			39%						
Sub Panamax	3.000	250	2	500	1.600		72	59											
Panamax	4.500	280	2	560			81	66											
Post Panamax I	5.700	300	2	600			87	70											
Sub Panamax	3.000	250	3	750			59	49	49-87	56	45	51	43	10%	9%	16%	14%		
Panamax	4.500	280	3	840			66	55		71	57	66	57	8%	4%	0%	4%		
Post Panamax I	5.700	300	3	900			70	59		79	64	73	62	13%	8%	4%	5%		

Fuente: Fundación Valenciaport a partir de valores de Drewry (2002 y 2010) y Ashar (2009)

Estimación de la productividad anual media de buque atracado

Por último finalizar reiterando la trascendencia “intrínseca” (que se suma a la proporcionalidad entre ambas variables) del número de atraques en la capacidad de la terminal. Como puede contrastarse en la Tabla 50, el aumento de capacidad “intrínseco” o “estructural” de pasar de 2 a 3 atraques en el Sistema M/E₄/n es del 36%, equivalente a pasar de una productividad media de buque atracado de 55 a 75.

Tabla 50. Comparación entre el incremento de capacidad resultado de elevar la productividad media del buque atracado o de pasar de 2 a 3 atraques

Mejora de la productividad media del buque atracado (P) (cont./h)						Sistema M/E ₄ /n			
P		Aumento de capacidad				Espera relativa	0,1		
de	a					Atraques (n)	Tasa de ocupación admisible %	Aumento de capacidad %	Pasar de n a "n + x" atraques Casos
de 35	a P	29%	57%	86%	114%	1	14%		
de 45			22%	44%	67%	2	36%	157%	de 1 a 2
de 55				18%	36%	3	49%	36%	de 2 a 3
de 65					15%	4	57%	58%	de 2 a 4
de 75						5	63%	75%	de 2 a 5
a P		45	55	65	75	6	67%	86%	de 2 a 6

Fuente: Fundación Valenciaport

*[...] callar cuando habla el que más sabe,
aprender a escuchar, esa es la clave,
si se tiene intenciones de saber.*

Alberto Cortez, poeta y cantante



Bibliografía

AGERSCHOU, H. "Facilities requirements". En: AGERSCHOU, H.; et al. *Planning and design of ports and marine terminals*. 2ª ed. Londres: Thomas Telford Ltd., 2004, p. 5-20.

AGUILAR, J.; OBRER-MARCO, R. "Estudio de la línea de atraque". En: Proyecto de optimización y estudio de la capacidad de terminales portuarias mediante modelos de simulación de la explotación: determinación de niveles de servicio. Informe inédito. CEDEX, 2008. Hito 3, p. 27-82.

ALDERTON, P. *Port management and operations*. 3ª ed. Londres: Informa Law, 1999. Lloyd's Practical Shipping Guides.

ARNAU, E. "Utilización de entornos visuales para la simulación de la ocupación de la línea de atraque". Proyecto final de carrera. Universidad Politécnica de Valencia, Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos. Valencia, 2000.

ASHAR, A. "Port productivity revisited". Presentado en: Terminal Operations Conference (TOC). Barcelona, 3-5 de junio de 1997.

ASHAR, A. "Alternative development plan for Central Chile ports". Presentado en: Terminal Operations Conference (TOC). Buenos Aires, 10-12 de noviembre de 2009.

ATKINS, W. *Modern marine terminal operations and management*. Oakland: Port of Oakland, 1983.

AUTORIDAD PORTUARIA DE BARCELONA. *Pliego de bases para la licitación de la concesión de la terminal de contenedores del Muelle del Prat*. Barcelona: Autoridad Portuaria de Barcelona, 2006.

BALLIS, A. "Introducing level of service standards for intermodal freight terminals". En: *Proceedings of TRB 2003 Annual Meeting* [CD-ROM]. Washington, 22-25 de enero de 2003.

BÉNÉZIT, M. *Cours de ports et travaux maritimes, Volume I*. París: École Spéciale des Travaux Publics du Batiment et de l'Industrie, 1921.

BICHOU, K. "Review of port performance approaches and a supply chain framework to port performance benchmarking". En: BROOKS, M.R.; CULLINANE, K. (ed.). *Devolution, port governance and port performance*. London: Elsevier, 2007, p. 567-598.

BICHOU, K.; GRAY, R. "A logistics and supply chain management approach to port performance measurement". *Maritime Policy & Management*, 2004, vol. 31, núm. 1, p. 47-67.

BROOKS, M.; PALLIS, A.A. "Linking port performance and post-evolution port governance models". En: *Proceedings of International Association of Maritime Economics (IAME) Conference*. Atenas, 4-6 de julio de 2007.

CERDÁ, A. *Memoria descriptiva del proyecto de las obras de distribución de la dársena del Puerto del Grao*. Valencia: Junta de Obras del Puerto de Valencia, 1878.

COMISIÓN TÉCNICA DE LA ROM 0.2. *ROM 0.2-90: Acciones en el Proyecto de Obras Marítimas y Portuarias* [en línea] Madrid: Organismo Público Puertos del Estado, 1990 [Consulta: agosto 2011]. Disponible en: http://www.puertos.es/programa_rom/rom_02_90.html

DE LANGEN, P.W.; NIJDAM, M.; VAN DER HORST, M. "New indicators to measure port performance". *Journal of Maritime Research*, 2007, vol. IV, núm. 1, p. 23-36.

DE MONIE, G. *Medición y evaluación del rendimiento y de la productividad de los puertos*. Nueva York: Naciones Unidas, 1988. Monografías UNCTAD.

DE MONIE, G.; THOMAS, B. J. "Improving port performance: measuring container terminal performance". Apuntes de l'Institut Portuaire d'Enseignement et de Recherche (IPER), Le Havre, 1998.

DEKKER, S. "Port investment. Towards an integrated planning of port capacity". Tesis Doctoral. Technische Universiteit Delft, Delft, 2005.

DEL MORAL, R. *Pasado y futuro del Puerto de Valencia: un enfoque económico*. Valencia: Puerto Autónomo de Valencia, 1991.

DOERR, O.; SÁNCHEZ, R.J. *Indicadores de productividad para la industria portuaria. Aplicación en América Latina y el Caribe*. Santiago de Chile: CEPAL, 2006. Serie Recursos Naturales e Infraestructura.

DRAGOVIC, B.; ZRNIC, Dj.; RADMILOVIC, Z. *Ports & container terminals modeling*. Belgrado: University of Belgrade, 2006.

DREWRY SHIPPING CONSULTANTS. *World container terminals*. Londres: Drewry Shipping Consultants Ltd., 1998.

DREWRY SHIPPING CONSULTANTS. *Global container terminals: profit, performance and prospects*. Londres: Drewry Shipping Consultants Ltd., 2002.

DREWRY SHIPPING CONSULTANTS. *Annual review of global container terminal operators*. Londres: Drewry Shipping Consultants Ltd., 2009.

DREWRY SHIPPING CONSULTANTS. *Container terminal capacity and performance benchmarks*. Londres: Drewry Shipping Consultants Ltd., 2010.

ENRÍQUEZ, F. "Productividad portuaria". *Revista de Obras Públicas*, 1961, núm. 2957, p. 667-678.

ENRÍQUEZ, F. *Terminales portuarias polivalentes: recomendaciones para su planificación y gestión*. Nueva York: Naciones Unidas, 1991. Monografías UNCTAD.

ESPAÑA. MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS Y TRANSPORTES. *Manual de evaluación de inversiones en puertos*. Madrid: Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT), 1992.

ESTRADA, J.L. “Mejora de la competitividad de un puerto por medio de un nuevo modelo de gestión de la estrategia aplicando el cuadro de mando integral”. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid (UPM), Madrid, 2007.

EUROPEAN SEA PORTS ORGANIZATION. *Port performance indicators, selection and measurement – PRISM* [en línea]. [s.l.]: European Sea Ports Organization (ESPO), 2011 [Consulta: agosto 2011]. Disponible en: <http://pprism.espo.be/>

FUSTER, J.M. “Puerto de Valencia: bases generales del plan de obra”. *Revista de Obras Públicas*, 1911, núm. 1841, p. 1-4.

GERMANISCHE LLOYD CERTIFICATION. *Container terminal quality indicator standard: the concept of increasing container terminal efficiency*. Hamburgo: Germanische Lloyd Certification, 2008.

GILMAN, S. *Container logistics and terminal design*. Washington, D.C.: World Bank, 1982.

GONZÁLEZ, M.M.; TRUJILLO, L. “La medición de la eficiencia en el sector portuario: revisión de la evidencia empírica”. Informe inédito. Universidad de la Laguna; Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 2006.

GONZÁLEZ-HERRERO, J.M.; COMISIÓN REDACTORA DE LA ROM 2.1. “ROM 2.1: obras de atraque y amarre. Criterios de proyecto”. En: MEDINA J.R. (ed.) *EROM 02*. Valencia: Editorial UPV, 2006. p. 3.1-3.65.

HENESEY, L.E. “Enhancing container terminal performance: a multi agent systems approach”. Proyecto Final de Carrera. Blekinge Institute of Technology, Karlshamn, 2004.

HENESEY, L.E. “Multi agent systems for container terminal management”. Tesis doctoral. Blekinge Institute of Technology, Karlshamn, 2006.

JUNTA DE OBRAS DEL PUERTO DE VALENCIA. *Memoria sobre el estado y progreso de las obras del Puerto de Valencia*. Valencia: Junta de Obras del Puerto de Valencia, 1913.

JUNTA DEL PUERTO DE VALENCIA. *Memoria Anual del Puerto de Valencia*. Valencia: Junta del Puerto de Valencia, 1972.

KAPLAN, R.S.; NORTON, D.P. *El Cuadro de Mando Integral (The Balanced Scorecard)*. 3ª reimp. Barcelona: Gestión 2000, 1997.

KENT, P.E.; ASHAR, A. "Indicators for port concessions contracts and regulation: the Colombian case". En: *Proceedings of International Association of Maritime Economics (IAME) Conference*. Lisboa, 6-9 de julio de 2010.

KOCH, T. "Operational strategies and philosophies". En: *Proceedings of Lloyd's Maritime Academy Seminar: terminal automation – Strategies and technology to drive terminal efficiency*. Londres, 1-2 de julio de 2008.

KUO, T.-C.; HUANG, W.-C.; WU, S. C.; et al. "A case study of inter-arrival time distributions of container ships". *Journal of Marine Science and Technology*, 2006, vol. 14, núm. 3, p. 155-164.

KUZNETSOV, A. "Height and cost in the balance". *Cargo Systems*, marzo 2008, p. 56-59.

LIGTERINGEN, H. *Ports and Terminals*. Delft: Technische Universiteit Delft, 2007.

MAESE, M. *Proyecto de los diques exteriores para el ensanche y mejora del puerto*. Valencia: Junta del Puerto de Valencia, 1896.

MARCONSULT. *Performances of container terminals: report*. Genova: Marconsult S.R.L., 2000.

MARTÍN SOBERÓN, A.M. "Planificación estratégica y adaptación del Cuadro de Mando Integral para terminales portuarias de contenedores". Tesina Fin de Máster. Universidad Pontificia de Comillas de Madrid, Máster en Gestión Portuaria y Transporte Intermodal, Madrid, 2010.

MEDAL, M.A.; SALA, R. *Análisis de la eficiencia del Sistema Portuario Español: estructura, evolución y perspectivas*. Valencia: Fundación Valenciaport, 2011.

MONFORT, A. “Planificación para la calidad: la táctica en el desarrollo de la futura terminal de contenedores del Puerto de Valencia”. Tesina Fin de Máster. Universidad Pontificia de Comillas de Madrid, Máster en Gestión Portuaria y Transporte Intermodal, Madrid, 1994.

MONFORT, A. “Tipología y evolución de las mercancías”. Ingeniería Portuaria, Sección II, vol. I. [Apuntes]. CEDEX, Madrid, 2005. Máster en Ingeniería de Puertos y Costas.

MONFORT, A. “Rendimiento y productividad en terminales”. Presentado en: Terminal Operations Conference (TOC). Guayaquil, 16-17 de septiembre de 2008.

MONFORT, A.; GÓMEZ-FERRER, R.; AGUILAR, J. “La medición del rendimiento portuario como elemento de competitividad: el caso de las terminales de contenedores”. En: *Actas del IV Congreso de Ingeniería del Transporte – CIT 2000*. Valencia, 7-9 de junio de 2000.

MONFORT, A.; AGUILAR, J.; GÓMEZ-FERRER, R.; et al. *Terminales marítimas de contenedores: el desarrollo de la automatización*. Valencia: Fundación Instituto Portuario de Estudios y Cooperación de la Comunidad Valenciana, 2001.

MONFORT, A.; SAPIÑA, R.; VIEIRA, P.; et al. “Estudio de las terminales de contenedores”. En: Proyecto de Optimización y estudio de la capacidad de terminales portuarias mediante modelos de simulación de la explotación: determinación de niveles de servicio. Informe inédito. CEDEX, 2008. Hito 3, p. 83-132.

MONFORT, A.; SAPIÑA, R.; MONTERDE, N.; et al. “Análisis de las TPCs como sistema nodal en la cadena logística de contenedores”. En: Proyecto de Metodologías de Automatización y Simulación para la evaluación y mejora de la capacidad, rendimiento y nivel de servicio de terminales PORTUARIAS de contenedores (MASPORT). Informe inédito. Ministerio de Ciencia e Innovación, 2009. Hito 2.1.

MONFORT, A.; MONTERDE, N.; SAPIÑA, R.; et al. *La terminal portuaria de contenedores como sistema nodal en la cadena logística*. Valencia: Fundación Valenciaport, 2011a.

MONFORT, A.; MARTÍN SOBERÓN, A.M.; CALDUCH, D.; et al. “El Cuadro de Mando Integral como herramienta de gestión para terminales portuarias de contenedores”. En: *Actas de las XI Jornadas españolas de Puertos y Costas*. Las Palmas de Gran Canaria, 5-7 de mayo de 2011b.

OBREER-MARCO, R.; AGUILAR, J. "A influencia da variabilidade dos comprimentos dos navios no cálculo de capacidade dos casi de containers". En: *Atas das 7ª Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*. Oporto, 6-7 de octubre de 2011.

OCEAN SHIPPING CONSULTANTS. *The European & Mediterranean container port markets to 2015*. Surrey: Ocean Shipping Consultants (OSC), 2006.

ORGANISMO PÚBLICO DE PUERTOS DEL ESTADO. "Las infraestructuras portuarias". En: ORGANISMO PÚBLICO DE PUERTOS DEL ESTADO (OPPE); DIRECCIÓN GENERAL DE LA MARINA MERCANTE (DGMM). *Plan sectorial de transporte marítimo y puertos. Informe Síntesis*. Madrid: Ministerio de Fomento, 2006.

OWINO, E.; WANG, T-F.; PASUKEVICIUTE, I. "Performance measurement in European container terminal industry: an empirical investigation". En: *Proceedings of International Association of Maritime Economics (IAME) Conference*. Melbourne, 12-14 de julio de 2006.

PÉREZ DE LA SALA, P. *Puertos y faros*. Madrid: Revista Anales de la Construcción y de la Industria, 1889.

PRODUCTIVITY COMMISSION. *International benchmarking of container stevedoring*. Melbourne: Productivity Commission, 2003.

RODRÍGUEZ, F. *Capacidad de los muelles*. Madrid: Ministerio de Obras Públicas y Transportes, 1977.

RODRÍGUEZ, F. *Dirección y explotación de puertos*. Bilbao: Puerto Autónomo de Bilbao, 1985.

SAANEN, I. "Maximizing terminal performance: doing more with less". En: *Terminal Operations Conference (TOC)*. Estambul, 19-21 de junio de 2007.

SANZ, M.; JUSTE, D.; LOZANO, C.; et al. "Multilevel approach modeling for port container terminal simulation". *Proceedings of International Conference on Harbor, Maritime & Multimodal Logistics Modelling and Simulation (HMS'2010)*. Fez, 13-15 de octubre de 2010.

SAPIÑA, R. "Indicadores de calidad en terminales de contenedores". *Boletín de la Fundación Valenciaport*, 2007, núm. 45, p. 1-2.

SAPIÑA, R. "Key performance indicators: the container terminal quality indicators system (CTQI)". Presentado en: Terminal Operations Conference (TOC). Amberes, 7-9 de junio de 2011.

SCHREUDER, M. "Application of approximate performance indicators for master planning of large ports". *Port Technology International*, 2005, vol. 26, p. 19-22.

STENVERT, R.; PENFOLD, A. *Marketing of container terminals*. Surrey: Ocean Shipping Consultants (OSC), 2004.

STENVERT, R.; PENFOLD, A. *Container port strategy: emerging issues*. Surrey: Ocean Shipping Consultants (OSC), 2007.

THOMAS, B.J. *Operations planning in ports*. [s.l.]: Naciones Unidas, 1985. Monografías UNCTAD.

THORESEN, C.A. *Port designer's handbook: recommendations and guidelines*. London: Thomas Telford Ltd., 2003.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. *Highway capacity manual*. Washington, D.C.: Transportation Research Board Publications, 2000.

UNCTAD. *Indicadores de rendimiento de los puertos*. Nueva York: Naciones Unidas, 1976.

UNCTAD. *Port development. A handbook for planners in developing countries*. Nueva York: Naciones Unidas, 1978.

UNCTAD. *Manual on a uniform system of port statistics and performance indicators*. Ginebra: Naciones Unidas, 1983.

UNCTAD. *Desarrollo portuario. Manual de planificación para países en desarrollo*. 2ª ed. Nueva York: Naciones Unidas, 1984.

UNCTAD. *Guidelines for port authorities and governments on the privatization of ports facilities*. Ginebra: Naciones Unidas, 1998.

VIGUERAS, M. *Curso de explotación y dirección de puertos. T.II, La planificación y la organización del puerto*. Madrid: Secretaría General Técnica. Servicio de publicaciones. Ministerio de Obras Públicas, 1977.

WANG, T.-F., CULLINANE, K.; SONG, D.W. *Container port production and economic efficiency*. Hampshire: Palgrave Macmillan Ltd., 2005.

WIESCHEMANN, A.; RIJSENBRIJ, J. "Stack handling system design. A drive for better productivity at lower cost". Presentado en: Terminal Operations Conference (TOC). Barcelona, 15-17 de junio de 2004.

WORLD BANK. *Port reform toolkit*. 2ª ed. Washington, D.C.: World Bank, 2007.

Recursos Web

Google Earth

Proyecto MASPORT: www.masport.es

*Manual de capacidad portuaria:
aplicación a terminales de contenedores*

La presente monografía es el segundo de los resultados tangibles del Proyecto “MASPORT: Metodologías de automatización y simulación para la evaluación y mejora de la capacidad, rendimiento, y nivel de servicio de terminales portuarias de contenedores” que ha contado con financiación del Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica (I+D+i) 2008-2011, en cuyo marco ya fue publicada con anterioridad la correspondiente a “La Terminal Portuaria de Contenedores como sistema nodal en la cadena logística”, estando prevista la publicación de una tercera monografía sobre innovaciones tecnológicas y de gestión de tales terminales que completará la trilogía.

En este documento, tras un breve repaso histórico de la evolución de la productividad por línea de atraque, se abordan las tipologías de terminales portuarias y se despliega el caso de las terminales portuarias de contenedores en relación con el cálculo de su capacidad una vez introducidos los conceptos de rendimiento, producción (tráfico), productividad, utilización, capacidad y nivel de servicio. Este se completa con un detallado ejemplo de empleo de la metodología para el cálculo de la capacidad de una terminal pública y de otra dedicada.

El objetivo de esta monografía es presentar una metodología para el cálculo de la capacidad de las terminales portuarias, que particularizada al caso de las terminales de contenedores, pueda emplearse como Manual práctico a efectos de la planificación de éstas, a la vez que se propone un innovador esquema de niveles de servicio.