

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

DEPARTAMENT DE CIÈNCIA I ENGINYERIA NÀUTIQUES

TESIS DOCTORAL

**OPTIMIZACION DE LA PRODUCCION EN UNA
TERMINAL MARITIMA DE CONTENEDORES.
UMBRALES Y PUNTO DE EQUILIBRIO.**

**Victor Eusebio Muñoz Cincà
2008**

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

DEPARTAMENT DE CIÈNCIA I ENGINYERIA NÀUTIQUES

TESIS DOCTORAL

**OPTIMIZACION DE LA PRODUCCION EN UNA
TERMINAL MARITIMA DE CONTENEDORES.
UMBRALES Y PUNTO DE EQUILIBRIO.**

Director : Dr. Francesc Lleal Galceran
Codirector : Dr. Ramón Macià Jové
Autor : Victor Eusebio Muñoz Cinca

Barcelona 19 de mayo de 2008

AGRADECIMIENTOS

Han sido muchos años de tesis, quizás demasiados y en consecuencia mucha ha sido la gente que me ha ayudado y / o soportado.

Principalmente mi Director de Tesis Francesc Lleal Galceran y la especial colaboración de Ramón Macià Jové como Codirector de la misma.

No me puedo olvidar de mi familia, que estos si que me han soportado de verdad, sobretodo los más próximos. Además de tenerlos a todos medio olvidados.

Me refiero principalmente a mi madre Anna, mi mujer Montse, mi hija Claudia y a mi hermano Josep muy especialmente.

Por último pero no por ello menos importante mis amigos y compañeros Miguel Angel Larriba Rodriguez, José Rueda Salinas, Carles Burzón Gonzalez y Silvia Arilla pero muy especialmente a Francisco Cañero Cuadrado sin cuyos *brainstormings* esto no hubiera ido ni “patrás”.

Barcelona 19 de mayo de 2008

RESUMEN

Esta tesis analiza el conjunto de operaciones que se realizan en una Terminal de Contenedores Marítima para crear un modelo que optimice el volumen de producción en función de costes, precios, estructura y recursos.

Para ello se analizan todos los procesos, en especial el rendimiento de explanada y su influencia en la productividad de operaciones de transferencia en muelle (buque) y tierra (camiones y ferrocarril). En base al rendimiento de explanada, costes y precios se determinan los umbrales de producción.

Definimos una Terminal de Contenedores como una *interfaz* o conexión entre varios modos de transporte (carretera, ferrocarril, marítimo y aguas interiores). Sus funciones son la *transferencia* de contenedores entre los diferentes modos y hacer de *almacenamiento temporal (buffer)* en el ínterin. No confundir con una función de almacenaje, la Terminal solo amortigua la conexión entre los diferentes modos de transporte.

El Sistema Operativo es el *conjunto de procesos* que optimizan la transferencia y almacenamiento temporal de los contenedores. Generalizando las operaciones se pueden dividir en dos tipos, operaciones de muelle y operaciones de tierra. Siguiendo otro criterio¹ también podríamos clasificarlos en procesos dinámicos, que serían los de transferencia y en procesos estáticos como el almacenamiento y estiba de la explanada.

El *Capítulo Primero*, describe la evolución histórica de los procedimientos de carga y descarga en los puertos hasta la aparición del contenedor. Continuamos con una introducción de las premisas para el diseño de una Terminal de contenedores. Para finalizar se definen objetivos y metodología del trabajo.

El *Capítulo Segundo*, describe la evolución de las Terminales de Contenedores Marítimas. Antecedentes y normalización del Contenedor, Transporte Combinado, Infraestructuras, la Investigación de Operaciones como herramienta para la creación de modelos y los diferentes estudios realizados sobre terminales de contenedores en función del método, alcance y objetivo.

El *Capítulo Tercero* es una introducción de los diferentes procesos tanto a nivel de transferencia o dinámicos como de planificación o estáticos. Se analizan las operaciones y los principales subprocesos relacionados como ciclos de máquina, planificación de explanada, tráfico, asignación de medios (humanos y mecánicos), asignación de atraques y análisis del flujo de camiones en puertas.

El *Capítulo Cuarto* es un estudio del rendimiento de explanada, se analizan las remociones, rotación del inventario y su relación con la ocupación y la productividad de las operaciones.

¹ Watabe, I. Container Terminal Planning: A Theoretical Approach. 1ª ed. Ashsted, Surrey KT21 2DJ: WCN Publishing, 2001, p. 1-50.

En el *Capítulo Quinto*, se definen, analizan y calculan los umbrales de producción y punto de equilibrio. El rendimiento de explanada combinado con los costes y precios de mercado determina los diferentes puntos a partir de los cuales la Terminal amortiza sus costes y maximiza el beneficio.

En el *Capítulo Sexto* concluye con la necesidad de aplicar modelos conjuntos en la operativa de terminales para obtener mejoras en su productividad y costes. Básicamente se trata de equilibrar la función dinámica con relación a la función estática.

En el *Capítulo Séptimo* finalmente se concluye que el grado de homogenización y la estancia de los containers conjuntamente con su *layout* son los factores determinantes que maximizan su rendimiento conjunto. Económicamente podemos llegar a saturar el nivel de producción pero es el cliente quien pone límite y obliga a optimizar rendimientos operativos, es por ello que la terminal debe buscar sus umbrales de producción siempre y cuando sus rendimientos operativos entren dentro de los márgenes del sector.

Por último en los anexos, se relacionan las características de las principales terminales del mundo, para finalizar con un análisis de las tendencias del sector.

CONTENIDO

RESUMEN	I
CONTENIDO.....	III
1 INTRODUCCIÓN	13
1.1 Evolución del transporte marítimo.....	13
1.2 El diseño introducción.....	23
1.3 Objetivos.....	24
1.4 Metodología.....	25
1.4.1 Historia del método científico.....	25
1.4.2 ¿Qué es el método científico?.....	27
1.4.3 La metodología en las operaciones portuarias.....	28
1.4.4 Diseño del Modelo y su Justificación.....	30
2 ESTADO DEL ARTE	32
2.1 Área de actuación	32
2.2 Antecedentes del contenedor como vehículo.....	32
2.2.1 Desarrollo del contenedor como vehículo de transporte	32
2.2.2 Definición del transporte combinado	33
2.2.3 Evolución de la normalización	34
2.2.4 Revolución en el transporte marítimo	40
2.3 Cambios en infraestructura portuaria y del transporte	47
2.3.1 Generalidades	47
2.3.2 Conveniencia de la containerización de las mercancías.....	49
2.3.3 La intermodalidad como elemento clave a los problemas de cuellos de botella en la distribución.....	50
2.4 Evolución de la investigación de operaciones	52
2.4.1 Generalidades	52
2.4.2 Características de la I.O.....	52
2.4.3 Enfoque de la I.O.....	53
2.4.4 Conclusiones.....	55
2.5 Antecedentes en estudios de productividad en terminales de contenedores portuarias. Estado del Arte	56
2.5.1 Generalidades	56
2.5.2 Estudios en función de su objetivo.....	57
2.5.3 Estudios en función del método	58
2.5.4 Estudios en función de su alcance	62

2.5.5	Resumen	62
3	EL SISTEMA OPERATIVO DE UNA TERMINAL DE CONTENEDORES. INTRODUCCION.	69
3.1	Resumen	69
3.2	Estudio de las distancias a bloque y Ciclo del Sistema.....	69
3.2.1	Nomenclatura.....	70
3.2.2	Cálculo del tiempo de ciclo productivo.....	70
3.2.3	Análisis de la distancia óptima y ciclo de máquina. Determinación del número de máquinas.....	71
3.2.4	Conclusión.....	75
3.3	Planificación de explanada. Objetivo	75
3.3.1	Nomenclatura.....	76
3.3.2	Ecuación de rendimiento de explanada	76
3.4	Estudio del rendimiento en función del tráfico. Generalidades de la circulación	80
3.4.1	Tipos de modelos y variables	80
3.4.2	Principales variables	81
3.4.3	Relaciones entre I, V, y D.....	83
3.4.4	Aplicación a un circuito de maquinaria pesada de una terminal de contenedores	86
3.4.5	Organización en zonas críticas	87
3.5	Asignación de manos. Generalidades	89
3.5.1	Metodología. Generalidades.....	90
3.5.2	Determinación del número de manos	90
3.6	Líneas de espera para atraques y grúas. Modelos.....	195
3.6.1	Modelo heurístico	95
3.6.2	Modelos matemáticos	96
3.6.3	Aplicación para un modelo de asignación de atraque y grúas.....	100
3.7	Líneas de espera para colas de camiones. Aplicación del modelo de colas	102
4	ESTUDIO DEL RENDIMIENTO	105
4.1	Introducción	105
4.2	Aplicación a una explanada de contenedores. Capacidad, Remociones, Distancias y Tráfico.....	106
4.3	Configuración de la explanada, los bloques. Cálculo de las remociones...	106
4.3.1	Definición del Bloque. Premisas operativas.....	107
4.3.2	Cálculo del número de remociones del conjunto elemental de un bloque. Remociones directas	108

4.3.3	Cálculo de las remociones en un bloque teniendo en cuenta la altura operativa de la máquina. Remociones indirectas que se generan.....	112
4.3.4	Modelo heurístico para el cálculo del número de remociones esperado para el próximo movimiento teniendo en cuenta las diferentes configuraciones para un índice de altura dado.....	116
4.3.5	Modelo analítico. Cálculo de las remociones esperadas totales en el próximo movimiento	147
4.3.6	Análisis de las remociones totales por bahía sin reposición.....	155
4.3.7	Conclusión.....	158
4.4	Primera aproximación al rendimiento medio de explanada	163
4.5	Rendimiento de Explanada.....	164
4.5.1	Ocupación crítica.....	172
4.5.2	Cálculo de la ocupación crítica. Considerando los coeficientes de paso de máquina y longitud de container	179
4.5.3	Rendimiento combinado. Según número de pilas de 20' y 40' pies	182
5	UMBRALES DE PRODUCCIÓN	185
5.1	Introducción y premisas.....	185
5.2	Umbrales de producción y punto de equilibrio. Definición.....	187
5.3	Análisis de los Umbrales y Punto de Equilibrio en una terminal marítima de contenedores. Costes variables, costes totales y coste marginal.....	192
5.3.1	Umbral de Producción.....	199
5.3.2	Umbral del Beneficio.....	205
5.3.3	Punto de Equilibrio.....	214
5.4	Cálculo numérico de los Umbrales y Punto de Equilibrio.....	223
5.4.1	Criterio de paro.....	225
5.4.2	Cálculo del umbral de producción.....	225
5.4.3	Cálculo del umbral del beneficio.....	233
5.4.4	Cálculo del punto de equilibrio	243
5.5	Análisis de sensibilidad	247
5.6	Conclusiones.....	251
6	BALANCE DEL SISTEMA.....	254
6.1	Resumen	254
6.2	Balance de procesos.....	254
7	CONCLUSIONES FINALES.....	264
7.1	Resumen	264

7.2 El Modelo	264
BIBLIOGRAFÍA	270
INDICE DE ACRONIMOS Y NOMENCLATURA ESPECIFICA.....	277
ANEXO A	279
Tendencia de los estudios y proyectos. Generalidades.....	279
Maquinaria.....	280
Procesos automáticos.....	281
Costes	282
La concentración empresarial en el sector marítimo	284
Tendencia a la concentración del tráfico en pocos puertos de trasbordo (hub & spoke, relay ports e interliners).....	286
ANEXO B	301
Terminales Marítimas.....	301
EUROPA	302
CARIBE	317
AUSTRALIA	317
ESTADOS UNIDOS	318
ASIA.....	320
ANEXO C	323
ANEXO D	328

FIGURAS

Figura 1 Construcción y elección del modelo'	31
Figura 2 Cálculo por elementos finitos de la estructura de un ULCS de 8000 TEUS ..	45
Figura 3 Máquina para 8000 TEU y 25 nudos de velocidad, para buques mayores o más de 25 nudos son necesarias dos máquinas o más de 12 cilindros.	46
Figura 4 Organización del tráfico entre patas de grúa, en una situación de tubo.....	88
Figura 5 <i>Split</i> , de la operativa de un buque y secuencias de trabajo	92
Figura 6 Servicios en serie, en un sistema de colas de camiones.....	102
Figura 7 Conjunto de contenedores (bahía) estibados por calle y módulo, manipulados con <i>Straddle Carrier</i>	109
Figura 8 Conjunto de contenedores estibados por módulo y calle, manipulados con <i>Transtainer</i>	109
Figura 9 Remociones. Para sacar el (3) se han hecho 2 remociones.....	110
Figura 10 Remociones indirectas que se generan en función del número de pilas en una bahía impar (para $r=7$ y $n=3$).....	112
Figura 11 Remociones indirectas que se generan en función del número de pilas en una bahía par (para $r=6$ y $n=3$).....	114
Figura 12 Para $n=2,5$ siendo $p=3$ y $r=4$, son posibles estas dos configuraciones.....	117
Figura 13 Para la misma configuración (3331) el número de remociones varía en función del estado.....	118
Figura 14 Configuración (3333) índice 3	126
Figura 15 Configuración (3332) índice 2,75	127
Figura 16 Configuraciones (3331, 3322) índice 2,50.....	129
Figura 17 Configuraciones (3330, 3321, 3222) índice 2,25.....	131
Figura 18 Configuraciones (3320, 3221, 3311, 2222) índice 2,00.....	133
Figura 19 Configuraciones (3310, 3220, 3211, 2221) índice 1,75.....	136
Figura 20 Configuraciones (3300, 3210, 3111, 2211, 2220) índice 1,50.....	139
Figura 21 Configuraciones (3200, 3110, 2210, 2111) índice 1,25.....	141
Figura 22 Configuraciones (3100, 2200, 2110, 1111) índice 1,00.....	143
Figura 23 Configuraciones (3000, 2100, 1110) índice 0,75.....	145
Figura 24 Configuraciones (2000, 1100) índice 0,50.....	146
Figura 25 Caída del rendimiento a partir de la ocupación crítica.....	177
Figura 26 Umbrales de producción, en un mercado de Competencia Perfecta a corto plazo	192
Figura 27 Ejemplo de buque trabajando con una grúa de doble carro a cada costado de una grada de operaciones.....	279
Figura 28 Buque atracado en doble grada, trabajando con cuatro grúas de doble carro por costado.....	280

GRÁFICOS

Gráfico 1 Distancia en función del tiempo de maniobra.....	73
Gráfico 2 Distancia y tiempo en función del rendimiento de buque con velocidad de straddlecarrier de 17 km/h y número de máquinas 2.....	74
Gráfico 3 Distancia y tiempo en función del rendimiento de buque con velocidad de straddlecarrier de 17 km/h y número de máquinas 3,5.....	75

Gráfico 4 Flujo diario y acumulado en TEUS, para una misma estancia a para la exportación (izquierda) e importación (derecha).....	79
Gráfico 5 Stock acumulado para los diferentes flujos exportación, importación, trasbordos, vacíos y total durante un periodo de seis meses.	80
Gráfico 6 Velocidad en función de la densidad de tráfico	86
Gráfico 7 Velocidad en función de la intensidad de tráfico	87
Gráfico 8 Intensidad en función de la densidad de tráfico	87
Gráfico 9 Ley de las productividades marginales decrecientes.....	104
Gráfico 10 Remociones esperadas para el próximo movimiento dimensión (3 x 7)...	151
Gráfico 11 Remociones esperadas para el próximo movimiento dimensión (3 x 6)...	151
Gráfico 12 Remociones esperadas para el próximo movimiento dimensión (3 x 5)...	152
Gráfico 13 Remociones esperadas para el próximo movimiento dimensión (3 x 4)...	152
Gráfico 14 Remociones esperadas para el próximo movimiento dimensión (3 x 3)..	153
Gráfico 15 Remociones esperadas S_m en función del número de pilas	153
Gráfico 16 Remociones esperadas S_m en función del número de pilas (r) para series de índices de altura equivalentes.....	154
Gráfico 17 Remociones totales para vaciar una bahía. Para diferentes ($N;r$).....	158
Gráfico 18 Rendimiento según la ocupación (número de containers) para diferentes (r) y altura máxima 3.	166
Gráfico 19 Igual que el anterior pero según el índice de altura.....	166
Gráfico 20 Grado de ocupación crítica en función del número de pilas para diferentes alturas máximas (N)	174
Gráfico 21 Rendimientos corregidos por ocupación crítica para $N=3$ y número de pilas igual a 4, 5, 6 ó 7 siendo el paso de máquina igual a (N).....	176
Gráfico 22 Rendimientos para $\alpha=1$ y 2 en función de la ocupación, $\beta=0,75$ y $0,25$	184
Gráfico 23 Rendimientos para $\alpha=1$ y 2 en función de la ocupación, $\beta=1$ y 0	184
Gráfico 24 Umbral de Producción. Para $e=3$; $S=10600$; $N=3$; y altura de maquinaria (2+1)	205
Gráfico 25 Primer caso, cuando el umbral del beneficio es $x_b < x_c$; para $e=3$; $S=10600$; $N=3$; y altura de maquinaria (2+1).	209
Gráfico 26 Tercer caso, cuando el umbral del beneficio es $x_b > x_c$; para $e=3$; $S=10600$; $N=3$; y altura de maquinaria (2+1)	211
Gráfico 27 Segundo caso, cuando el umbral del beneficio es $x_b = x_c$; para $e=8$; $S=10600$; $N=3$; y altura de maquinaria (2+1)	212
Gráfico 28 Zoom del segundo caso $X_c = 93507.14$ TEUS.....	213
Gráfico 29 Punto de equilibrio para $x_q < x_c$	218
Gráfico 30 Punto de equilibrio para $x_q > x_c$	220
Gráfico 31 Punto de equilibrio para $x_q = x_c$	221
Gráfico 32 Zoom en el punto de equilibrio para $x_q = x_c$	222
Gráfico 33 Umbral de Producción.....	232
Gráfico 34 Zoom del umbral de producción, $x_p = 52496.9966$; $f_p = 6.2675E-08$	233
Gráfico 35 Umbral del beneficio.	234
Gráfico 36 Zoom del Umbral del Beneficio, $x_b = 89142.86$ TEUS	235
Gráfico 37 Para una estancia de 16 días $x=55272,88$	236
Gráfico 38 Umbral del Beneficio para una estancia de 4.5 días.....	237
Gráfico 39 Zoom del U_b para 4.5 días.	237
Gráfico 40 Punto de Equilibrio 107753,442 TEUS, para $e = 9,5$ días y $w = 80$ euros	243
Gráfico 41 Zoom del Punto de Equilibrio, 107753.442 TEUS	244
Gráfico 42 Punto de equilibrio 81587,4819 TEUS, para $e = 9,5$ días y $w = 20$ Euros.	245

Gráfico 43 Coste por año según maquinaria de transferencia utilizada (según tabla anterior).....	283
Gráfico 44 Puerto de NewYork/New Jersey, histórico de 1991 al 2005 por contenedores y TEUS.....	299

TABLAS

Tabla 1 Normas ISO para contenedores.....	38
Tabla 2 ISO 6346, códigos identificativos por tipo de contenedor.....	39
Tabla 3 Tipos de buques portacontenedores año 2006.....	42
Tabla 4 Tipos de grúas Portainer.....	44
Tabla 5 Dimensión (3x3) 3 alturas por 3 pilas. Configuraciones y Estados.....	121
Tabla 6 Dimensión (3x4) 3 alturas por 4 pilas. Configuraciones y Estados.....	122
Tabla 7 Dimensión 3x3 tabla de Probabilidades Estacionarias y Remociones.....	123
Tabla 8 Dimensión 3x4 tabla de Probabilidades Estacionarias y Remociones.....	124
Tabla 9 Errores para la dimensión 3x3.....	159
Tabla 10 Errores para la dimensión 3x4.....	159
Tabla 11 Errores para la dimensión 3x5.....	160
Tabla 12 Errores para la dimensión 3x6.....	161
Tabla 13 Errores para la dimensión 3x7.....	162
Tabla 14 Para las dimensiones 3x3, 3x4, 3x5, 3x6, 3x7.....	163
Tabla 15 Rendimientos para las dimensiones 3x7; 3x6; 3x5; 3x4; 3x3.....	167
Tabla 16 Remociones esperadas, Rendimiento y Coste Añadido en una pila de 3x7 containers.....	168
Tabla 17 Remociones, Rendimiento y Coste Añadido de 3x6.....	169
Tabla 18 Remociones, Rendimiento y Coste Añadido de 3x5.....	170
Tabla 19 Remociones, Rendimiento y Coste Añadido de 3x4.....	170
Tabla 20 Remociones, Rendimiento y Coste Añadido de 3x3.....	171
Tabla 21 Diferencias de ocupación crítica en un mismo espacio para diferentes subdivisiones (20' y 40's).....	174
Tabla 22 Ocupaciones críticas en función de la dimensión de la bahía.....	175
Tabla 23 Rendimientos corregidos por nivel de ocupación crítica para $p=N$	179
Tabla 24 Ocupación Crítica en función de los coeficientes de paso y ocupación para una combinación 3X14 (20') y 3X7 (40').....	181
Tabla 25 Rendimientos para diferentes combinaciones de 20' y 40' para una misma cantidad de TEUS para $\beta=1$ y 0.....	183
Tabla 26 Sensibilidad de la producción (x) con el parámetro (e).....	214
Tabla 27 Para valores pequeños converge muy lentamente.....	227
Tabla 28 Para valores iniciales > 200% de su valor verdadero diverge.....	227
Tabla 29 Con 5 iteraciones ya tenemos una aproximación a la unidad de TEU.....	228
Tabla 30 Valor inicial muy pequeño. Con 4 iteraciones ya llega a una aproximación de la unidad.....	229
Tabla 31 Valor inicial muy grande. 9 iteraciones con precisión de la unidad de TEU.....	230
Tabla 32 Valor inicial del orden del valor verdadero. 1 iteración para llegar a una precisión de unidad de TEU.....	230
Tabla 33 Valor inicial muy pequeño. Con 5 iteraciones ya llega a una aproximación de la unidad.....	231

Tabla 34 Valor inicial muy grande. Necesita 10 iteraciones para una precisión de la unidad de TEU.....	231
Tabla 35 Valor inicial del orden del valor verdadero. 2 iteraciones para llegar a una precisión de unidad de TEU.	232
Tabla 36 Para un valor inicial pequeño. Converge lentamente.	238
Tabla 37 Valor inicial próximo al verdadero.....	240
Tabla 38 Valor inicial grande, converge lentamente.....	241
Tabla 39 Para valores iniciales pequeños converge rápidamente.....	241
Tabla 40 Número de iteraciones para valores iniciales del orden del verdadero. Converge muy rápidamente.....	242
Tabla 41 Número de iteraciones para valores iniciales grandes. Converge rápidamente.	242
Tabla 42 Número de iteraciones para valores similares al real, converge rápidamente.	246
Tabla 43 Número de iteraciones para valores mayores que el real.	246
Tabla 44 Número de iteraciones para valores más pequeños que el buscado	247
Tabla 45 Sensibilidad del índice de ocupación con respecto a e , S	249
Tabla 46 Sensibilidad de la ocupación máxima con respecto a e , S	250
Tabla 47 Medidas de eficiencia de las terminales marítimas de contenedores	257
Tabla 48 Características iniciales del modelo	258
Tabla 49 Ocupaciones y rendimientos parciales de los medios de producción.....	260
Tabla 50 Corrección de la ocupación por desviaciones	261
Tabla 51 Incidencia de la productividad de Grúa.....	262
Tabla 52 Productividad de transferencia tiempos de espera y número de máquinas utilizadas.....	262
Tabla 53 Costes Variables según grado de homogeneidad	266
Tabla 54 Ocupación de los diferentes Umbrales según el grado de homogeneidad	267
Tabla 55 Comparación de costes en la operativa poza-bloque y viceversa.....	282
Tabla 56 Ranking mundial de navieras en 2006	285
Tabla 57 Top 10 de Operadores globales de Terminales de containers.....	286
Tabla 58 Ranking de los 100 primeros puertos en tráfico de contenedores con incrementos anuales. 1997 / 1998.	288
Tabla 59 Ranking mundial comparativo por toneladas y TEUS de 1998.	289
Tabla 60 Ranking mundial comparativo por toneladas y TEUS 2002.....	291
Tabla 61 Ranking mundial comparativo por TEUS 2003.....	293
Tabla 62 Ranking mundial comparativo por toneladas y TEUS 2004.....	295
Tabla 63 Ranking mundial comparativo por TEUS 2005 (preliminar).....	296
Tabla 64 Comparativa entre los tres puertos más importantes de España.....	297
Tabla 65 Comparativa entre los tres puertos más importantes de España.....	297
Tabla 66 Top 20 en TEUS de los puertos europeos en el 2004.....	298
Tabla 67 Evolución de la producción en Amberes que ocupa el 9º lugar a nivel mundial.	300
Tabla 68 TERMINAL DE CONTENIDORS DE BARCELONA, Grup TCB S.L. Fuente; www.tcbcn.com	302
Tabla 69 APM ALGECIRAS, APM. Fuente: www.apmterminals.com	303
Tabla 70 MARITIMA VALENCIANA, Grupo Dragados. Fuente: www.marvalsa.com	304
Tabla 71 Terminal de BURCHARDKAI de Hamburger Hafen und Lagerhaus-AG (HHLA). Fuente www.hhla.de	304

CONTENIDO

Tabla 72 Terminal de ALTENWERDER de HHLA. Fuente: www.hhla.de	305
Tabla 73 EUROKAI Container Terminal Hamburg GmbH. Fuente: www.eurogate.de	305
Tabla 74 EUROGATE Container Terminal Bremerhaven GMBH. Fuente: www.eurogate.de	306
Tabla 75 NORTH SEA Terminal Bremerhaven. Join venture entre Eurogate y APM. Fuente: www.ntb-bremerhaven.de	306
Tabla 76 NOORDZEE Terminal. Hesse Noord Natie (HNN). PSA posee un 65% desde abril de 2001. Fuente: www.hnn.be	307
Tabla 77 DEURGANCK (Left Bank) Terminal, HNN. Fuente: www.hnn.be	308
Tabla 78 EUROPA Terminal, HNN. Fuente: www.hnn.be	308
Tabla B-79 TRINITY Terminal. Hutchison Port Holdings HPH. Fuente: www.portoffelictowe.co.uk	309
Tabla 80 LANDGUARD Terminal. HPH. Fuente: www.portoffelictowe.co.uk	310
Tabla 81 ECT Delta Terminal, Europe Container Terminals, ECT. Fuente: www.ect.nl	310
Tabla 82 ECT Home Terminal, ECT. Fuente: www.ect.nl	311
Tabla 83 ECT HANNO Terminal, ECT. Fuente: www.ect.nl	312
Tabla 84 CERES PARAGON. Fuente: www.ceresglobal.nl	312
Tabla 85 MARSAXLOKK Freeport Container Terminal. Malta Freeport Corporation. Fuente: www.freeport.com.mt	313
Tabla 86 VOLTRI Terminal Europe, PSA. Fuente: www.vte.it	313
Tabla 87 MEDCENTER CONTAINER TERMINAL, CONTSHIP Italia Group (EUROGATE). Fuente: www.eurogate.de	314
Tabla 88 ELEFThERIOS VENIZELOS CONTAINER TERMINAL. PIRAEUS PORT AUTHORITY S. A. Fuente: www.olp.gr	315
Tabla 89 TERMINAUX DE NORMANDIE, T-N. Fuente: www.t-n.fr	315
Tabla 90 FOS CONTAINER TERMINAL. Port Autonome de Marseille PAM. Fuente: www.marseille-port.fr	316
Tabla 91 SKANDIA CONTAINER TERMINAL. www.portgot.se	316
Tabla 92 FREEPORT BAHAMAS. Fuente: www.hph.com.hk	317
Tabla 93 PORT BOTANY. Fuente: www.patrick.com.au	318
Tabla 94 BARBOURS CUT TERMINAL. Fuente: www.portofhouston.com	318
Tabla 95 NORFOLK Internacional Terminals, VIRGINIA TERMINALS. Fuente: www.vit.org	319
Tabla 96 APM Port Elizabeth, APM. Fuente: www.panynj.gov . < www.apmterminals.com >	320
Tabla 97 MAHER TERMINAL New Jersey. Fuente: www.panynj.gov / www.maherterminals.com >	320
Tabla 98 Capacidad estructural y parque de maquinaria de las 4 Terminales de PSA Singapur: TANJONG PAGAR, BRANI, KEPPEL y PASIR PANJANG. Fuente: www.singaporepsa.com	321
Tabla 99 Capacidad estructural y parque de maquinaria de las Terminales de HPH Hongkong y RIVER TRADE: HIT 4-6-7&9, COSCO-HIT y RIVER TRADE. Fuente: www.hph.com.hk / www.rttc.com.hk	322
Tabla 100 Configuraciones y estados para una Bahía de dimensión 3x3	323
Tabla 101 Dimensión 3x4	324
Tabla 102 Dimensión 3x5	325
Tabla 103 Dimensión 3x6	326

Tabla 104 Dimensión 3x7	327
Tabla 105 Matriz de las probabilidades de transición y remociones para una dimensión 3x3	328
Tabla 106 Matriz de las probabilidades de transición y remociones para una dimensión 3x4	329
Tabla 107 Matriz de las probabilidades de transición y remociones para una dimensión 3x5 de 9 a 15 containers	330
Tabla 108 Matriz de las probabilidades de transición y remociones para una dimensión 3x5 de 0 a 8 containers	331

FOTOS

Foto 1 Manipulación de carga general en los arrastres de una bodega	13
Foto 2 Descarga de contenedores con puntales y <i>spreader</i> semiautomático	14
Foto 3 Carga general del buque Strathbrora, Londres (King George V Dock) 1968.....	15
Foto 4 Hawaiian Merchant pasando por el <i>Golden Gate</i> en su maniobra de salida de San Francisco rumbo a Hawai, 31 de Agosto de 1958.....	17
Foto 5 Hawaiian Citizen, 1960. Primer buque portacontenedores	18
Foto 6 Primera Grúa Portainer, construida por PACECO para La Matson Navigation Company (1959).....	19
Foto 7 Muelle de operaciones para buques de carga general, buques de la línea San Francisco – Hawai en 1948	20
Foto 8 Operativa en el buque Moreton Bay, Tilbury 1971	21
Foto 9 Buque Cornelius Maersk operando en Singapur.....	22
Foto 10 Terminal de Contenedores de Barcelona (TCB).....	23
Foto 11 El Ideal-X en su histórico primer viaje en Port Newark, abril de 1956	41
Foto 12 Estructura celular del Moreton Bay, Tilbury 1971	43
Foto 13 Operativa del buque Sovereign Maersk de 6600 TEUS, trabajando con 4 grúas Post-Panamax y una Panamax	44

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Evolución del transporte marítimo

El contenedor se ha utilizado desde los albores del comercio, por ejemplo en la antigua Roma se transportaban vino y aceites envasados en ánforas precintadas. A lo largo de los siglos se ha seguido intentado consolidar las mercancías en cajas normalizadas y cada vez más grandes, pero estas intenciones se han visto frenadas por la complejidad de la estructura *multimodal* necesaria para su manipulación.

En consecuencia el transporte de mercancías en régimen de *Carga General*^{1,2} ha sido “el tipo de manipulación y estiba” utilizado en el transporte hasta la aparición de buques especializados para cargas a granel, esto es, los buques tanque (petroleros, gaseros y quimiqueros), los graneleros (cementeros, *bulkcarriers* y *orecarriers*) y la carga rodada (buques Ro-Ro³), pero la carga general continuaba siendo mayoritaria en los diferentes modos del transporte.



Foto 1 Manipulación de carga general en los arrastres de una bodega⁴

¹ Thomas R.E. *The Properties and Stowage of Cargoes*. 6th ed. Revised. Glasgow: Brown, Son & Ferguson, 1971.

² Sauerbier, C. *Marine Cargo Operations*. New York: John Wiley & Sons, 1956. Library of Congress Catalog card Number: 56-7164.

³ Buques Roll on / Roll off

⁴ © Matson Navigation Co.

La carga general^{5,6} utilizaba aparejos simples en cuanto a su diseño y mecánica pero complejos en cuanto a su manipulación. El Puntal ha sido desde los inicios el medio de carga y descarga más utilizado por los buques, otras variantes del puntal son las Cabrias, utilizadas para operaciones de carga desde barcazas, la Pluma Real, utilizada para manipular grandes pesos y los Andariveles para operaciones buque-buque.



Foto 2 Descarga de contenedores con puntales y *spreader* semiautomático⁷

⁵Reiriz Basoco, J. Compendio de estiba. EON La Coruña. Apuntes de la cátedra de Maniobra y Estiba. 1975, p. 35-56.

⁶Barbudo Duarte, E. [et al.]. Tratado de Maniobra. 6ª ed. Cádiz: Colección Fragata, 1980, p. 79-189.

⁷ © Matson Navigation Co.

INTRODUCCIÓN

En la década de los setenta los puntales van siendo sustituidos por grúas de a bordo fijas, grúas de a bordo móviles o Chaparral y por grúas Pórtico o Pico de Pato (no confundir con *Portainer* ni con *Transtainer* o Grúa Puente) en muelle, más rápidas y versátiles que los puntales.

Para las izadas se utilizaba también un utillaje portuario complejo, Estrobos de fibra vegetal, de alambre y de lona también llamados Fajas, Redes, Eslingas de uno a cuatro brazos pudiendo ser de fibra, alambre o cadena, que se guarnen según convenga con ganchos, gafas, etc.



Foto 3 Carga general del buque Strathbrora, Londres (King George V Dock) 1968⁸

⁸ © National Maritime Museum, London

Entre la diversidad de contenedores utilizados antes de la aparición del container,⁹ citaremos a modo genérico la Barrilería (bocoy, bota, pipa, bordelesa, tercerola, cuarterola, tabal, cuñete, etc.), Garraferío (garrafas, garrafones y damajuanas), Atados (fardos, pacas y balas), Cajerío (jaulas, jaulones y cadres), y Bidonería.

La Paleta o *Pallet* ha sido el paso intermedio entre la carga general y el container, fue introducida en Europa al terminar la segunda guerra mundial por el ejército norteamericano, dado que fue en Estados Unidos donde primero se utilizaron. Inicialmente eran unos recipientes o bandejas con formas y capacidades diversas que se utilizaban para el transporte de material en las cadenas de producción de la industria. La paleta no cuajó hasta su consolidación en Europa y posterior normalización. Actualmente se sigue utilizando para la carga de containers, en la carga general y en la industria son los *canvas* de las cadenas de producción.

En la historia del transporte marítimo ha habido tres puntos de inflexión, el primero, la aparición a mediados del siglo XIX de los grandes veleros compuestos de hierro y madera y posteriormente en la última mitad del siglo las naves de hierro y acero, con este cambio nace el transporte a gran escala.^{10, 11}

El segundo cambio fue la aparición de la máquina de vapor también en el siglo XIX y ya en el siglo XX una nueva fuente de energía empieza a sustituir al carbón, los derivados del petróleo fuel-oil y gas-oil, nacen los motores diesel. En 1950 el 22% de los sistemas de propulsión de los buques eran de máquina alternativa de vapor (carbón), el 55% fuel¹², el 22% diesel y el 1% eran veleros¹³.

En la década de los años cincuenta aparece el container (si bien todavía no estaba normalizado) como envase para el transporte multimodal, aunque conjuntamente con la carga general en buques convencionales y manipulados normalmente con medios de a bordo. La economía de escala será determinante en la progresión del container y del transporte multimodal.

Los primeros tráficos fueron abiertos por Sealand entre New York y Houston o de una manera más amplia entre la costa Este de Estados Unidos y el Golfo de México, el primer viaje lo realizó el IDEAL-X en 1956, un petrolero reconvertido para poder transportar contenedores en cubierta.

⁹ En la mayoría de contextos, llamaremos *container* al contenedor normalizado para diferenciarlo del resto.

¹⁰ Goldsmith-Carter, G. Veleros de todo el mundo. 1ª ed. Barcelona: Editorial Bruguera, 1970, p. 112-148.

¹¹ De Brossard, M. Historia Marítima del Mundo. 1ª ed. Barcelona: Ediciones Amaika, S.A., 1976, p. 207-229.

¹² En realidad el combustible es una mezcla de fuel-oil y gas-oil llamado IFO, siendo el más utilizado el IFO-180.

¹³ Reiriz Basoco, J. Compendio de estiba. EON La Coruña. Apuntes de la cátedra de Maniobra y Estiba. 1975, p.1-4.

Posteriormente, en 1958, la naviera Matson inició el tráfico de contenedores entre la costa Oeste de Estados Unidos y Hawai, con buques tipo C-3¹⁴ adaptados para poder transportar contenedores en cubierta.



Foto 4 Hawaiian Merchant pasando por el *Golden Gate* en su maniobra de salida de San Francisco rumbo a Hawai, 31 de Agosto de 1958¹⁵

¹⁴ Buques de Carga General equipados con puntales, construidos en la década de los 40 con créditos del gobierno norteamericano. Eslora 149 metros, manga 21 metros, calado máximo 8.68, 8.500 HP, 16.5 nudos.

¹⁵ © Matson Navigation Co.



Foto 5 Hawaiian Citizen, 1960. Primer buque portacontenedores ¹⁶

También en esta década¹⁷ en 1958, la Pacific Coast Engineering Company (PACECO) diseña y construye la primera grúa *Portainer* del mundo, por encargo de Matson Navigation Company, cambiando radicalmente el concepto de manipulación de la carga en los muelles. Esta primera grúa entró en operaciones en *Encinal Terminals* de Alameda, California, el 7 de enero de 1959. Actualmente sigue en operaciones en el puerto de Nanjing, China¹⁸.

¹⁶ © Matson Navigation Co.

¹⁷ Monfort A. [et al.]. *Terminales marítimas de contenedores: El desarrollo de la automatización*. 1ª ed. Valencia: IPEC (Fundación Instituto Portuario de Estudios y Cooperación de la Comunidad valenciana), 2001, p. 104-105.

¹⁸ ASME (The American Society of Mechanical Engineers). *The PACECO Container Crane. The World's First High Speed, Dockside, Container Handling Crane*. A: ASME. [en línea]. [Consulta: 6 de enero 2005]. Disponible en <<http://www.asme.org/history/brochures/h085.pdf>>

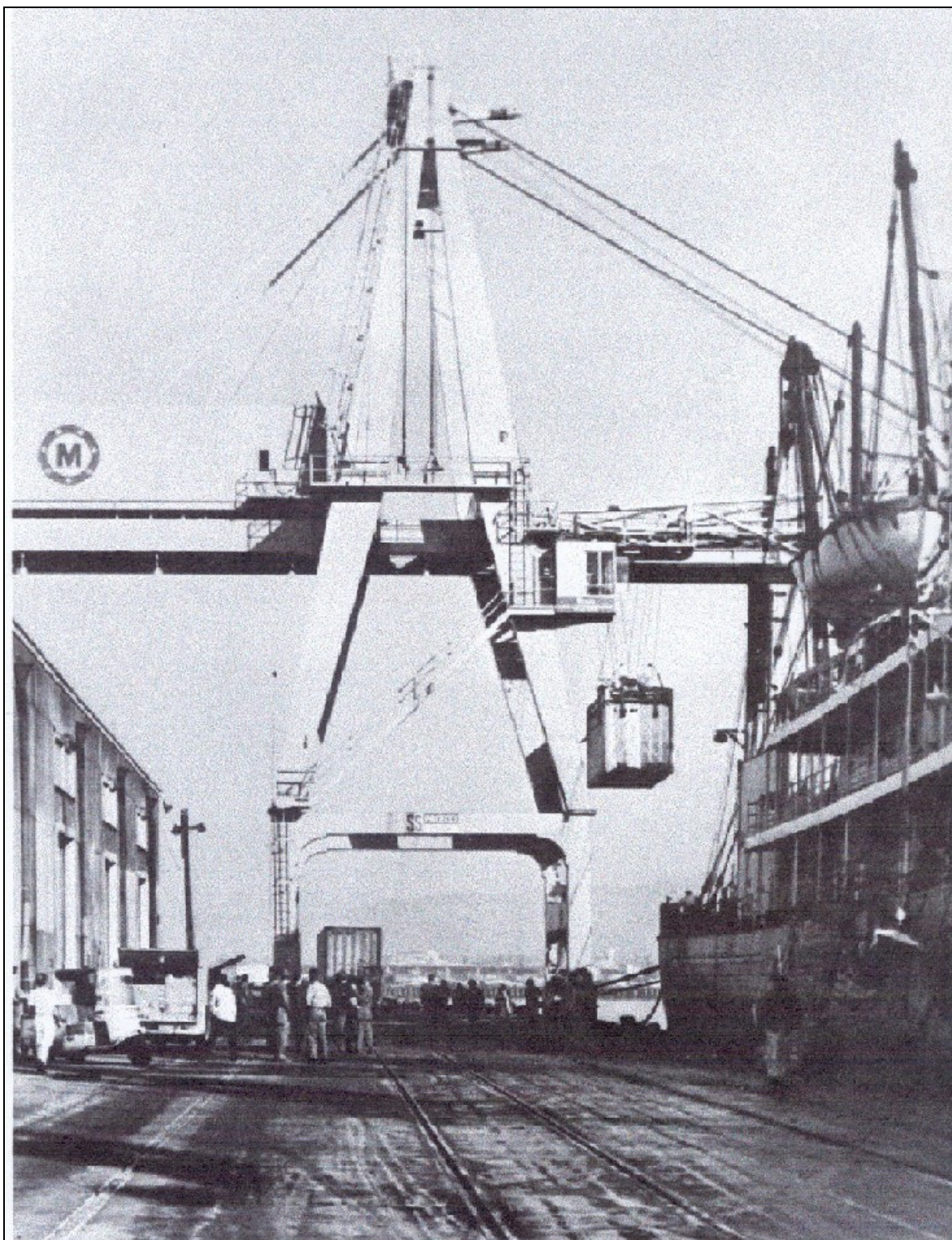


Foto 6 Primera Grúa Portainer, construida por PACECO para La Matson Navigation Company (1959)¹⁹

¹⁹ Fuente: American Society of Mecanical Engineers (ASME).

Las terminales de contenedores nacen a finales de los años 60, como consecuencia de los primeros viajes de buques portacontenedores entre Europa y Estados Unidos. Son producto de la transformación de terminales de Puerto Propietario²⁰ o Puerto Explotador a concesiones para empresas estibadoras de carga general, que como consecuencia del cambio generado por el container se van transformando paulatinamente en terminales polivalentes y posteriormente a principios de los años setenta nacen las primeras terminales de contenedores puras.

Estas terminales de contenedores se instalan en grandes puertos de importación / exportación como New York²¹, Baltimore, Róterdam, Amberes, Bremen y Hamburgo, posteriormente van apareciendo terminales de tipo medio como Barcelona, Tilbury, Felixstowe, La Spezia, Fos sur Mer, Génova, Yokohama, Kobe, Nagoya, Osaka, etc., a finales de los años noventa las líneas intentando optimizar la rotación de sus buques en función de capacidad, velocidad, tiempo de tránsito y coste, distinguen entre rotaciones *Origin-to-Destination* llamadas redes (*ORIDES*) y una rotación basada en minimizar las escalas apoyándose en terminales intermodales que distribuyen las cargas mediante *feeder*, ferrocarril, etc., redes (*MAIN*)²².



Foto 7 Muelle de operaciones para buques de carga general, buques de la línea San Francisco – Hawaii en 1948²³

²⁰ El Puerto *Propietario* gestiona la utilización de las infraestructuras e instalaciones. El puerto *Instrumento* participa en las obras de las infraestructuras y en la financiación de maquinaria. El puerto *Explotador* asume las funciones de los puertos *Propietario* e *Instrumento* y además realiza la explotación.

²¹ La Autoridad Portuaria de New York adquirió y arrancó las primeras terminales de contenedores en *Port Newark* y *Elizabeth-Port Authority Marine Terminal* (Malcom McLean y Guy Tozzoli) en la década de los años cincuenta.

²² Chadwin, M.L. [et al.]. *Ocean Containers Transportation: An Operational Perspective*. New York: Taylor & Francis, 1990. ISBN 0-8448-1628-0.

²³ © Matson Navigation Co.

La evolución de las redes de transporte hace que puertos como New York o Kobe por ejemplo, tengan una ralentización en su tráfico de contenedores como consecuencia de la competencia de otras terminales de puertos vecinos y del auge de los puertos *Hub* o puertos de trasbordo como Singapur, Hong Kong, Kaoshiung, Algeciras, Gioia Tauro, etc., en cambio puertos como Róterdam o Barcelona no sólo se han mantenido sino que han aumentado como consecuencia de que son puertos mixtos, es decir operan como puertos *Hub* para algunos tráficos y al mismo tiempo poseen un importante *Hinterland* o zona de influencia.



Foto 8 Operativa en el buque Moreton Bay, Tilbury 1971²⁴

²⁴ © National Maritime Museum, London



Foto 9 Buque Cornelius Maersk operando en Singapur²⁵

²⁵ © A. P. Moller - ;Maersk A/S

1.2 El diseño introducción

El diseño de una Terminal de contenedores tiene dos fases. La primera un análisis de la necesidad de una Terminal en base a un estudio macroeconómico de la región y su *hinterland* y una segunda con un enfoque microeconómico que permita definir cuales serán las características de la Terminal en detalle.



Foto 10 Terminal de Contenedores de Barcelona (TCB)²⁶

La primera fase o análisis macroscópico pretende determinar en primer lugar la necesidad de establecer una Terminal y en segundo lugar, desde un enfoque estructural, su objetivo es conocer las infraestructuras portuarias necesarias, como la longitud y calados de la línea de atraque, el área necesaria para el almacenamiento de los contenedores y resto de las instalaciones, orientación, amplitud y máximo calado de la bocana, canales de navegación y dársenas. Por otro lado se requiere un análisis de las vías de comunicación, como transporte por carretera, ferrocarril, vías navegables interiores y cabotaje.

La segunda fase desde un enfoque microscópico busca definir más en detalle las necesidades estructurales y de diseño de la Terminal en base a unos datos (índices, parámetros ó variables) y su proyección en el tiempo.

En cuanto a las premisas básicas de esta segunda fase, sin entrar en detalles, estamos hablando en primer lugar del diseño estructural y operativo de una Terminal de contenedores (recursos): Infraestructuras, *layout*, tipo y cantidad de grúas, tipo y cantidad de maquinaria de explanada. En segundo lugar de las variables: Tráfico de camiones, ferrocarriles, buques, contenedores según sus flujos relativos (importación, exportación, trasbordos, vacíos) y rotación del inventario.

²⁶ Fuente: Terminal de Contenedors de Barcelona, S.L.

El diseño estructural y operativo de una Terminal de contenedores o layout se refiere a la forma que pueda tener el área de la misma, situación, orientación y cantidad de las diversas instalaciones como edificio principal, taller, almacén, tipo y número de puertas (entrada y salida de contenedores, carga general, personal, visitas, pertrechos y talleres subcontratados), estaciones frigoríficas, área de aparcamiento de contenedores, longitud y posible subdivisión de la línea de atraque, organización del tráfico y del muelle de operaciones (poza).

El tipo y cantidad de grúas es función del flujo y distribución de los contenedores y de la frecuencia relativa de los buques en función de su tamaño. Es decir el tipo de grúas depende de las dimensiones de los buques y la cantidad depende del número de contenedores que se tenga que manipular y de la distribución de la frecuencia de los buques.

El tipo y cantidad de maquinaria depende del flujo de contenedores, del tipo de *layout* (bloques de *transtainer*, *vancarrier*, etc..) y del tipo de flujo (importación, exportación, trasbordos, vacíos). En cuanto al flujo es importante conocer su distribución, por ejemplo una Terminal que manipule un gran porcentaje de trasbordos requerirá menos área de explanada²⁷ y menos maquinaria²⁸, por otro lado si el porcentaje de vacíos fuese importante variaría el *layout* (mayor altura en las estibas) y el tipo de maquinaria empleada más simple y menos costosa.

Es importante el diseño del *tráfico* teniendo en cuenta la seguridad, la eficiencia operativa y la flexibilidad. El tráfico es uno de los factores de riesgo más importante en cuanto a accidentes laborales en el entorno portuario sobretodo en las interfaces con las grúas en el muelle (poza), con zonas peatonales y zonas de carga y descarga de camiones. Además la productividad de las grúas puede llegar a disminuir del orden de un 25% y la velocidad de las máquinas de explanada un 33% en función de la densidad del tráfico operativo por lo que una óptima organización del mismo es fundamental.

El análisis del *tamaño y frecuencia relativa de los buques* es otro punto importante a la hora de diseñar una Terminal. La capacidad de contenedores en explanada, longitud y profundidad de muelle, tipo y cantidad de grúas dependen de estas variables.

1.3 Objetivos

Este trabajo pretende diseñar un *modelo* que calcule los volúmenes de producción óptimos de una Terminal marítima de contenedores en función de sus costes y precios de mercado.

²⁷ Dos movimientos de trasbordo ocupan un solo espacio al tratarse del mismo contenedor que es descargado del buque madre y cargado en un feeder o viceversa.

²⁸ Habrá menos transferencia de puerta y ferrocarril, en consecuencia se necesitará menos maquinaria de explanada.

Primeramente se analiza el rendimiento de los diferentes procesos que intervienen en la operativa de una Terminal marítima de contenedores para maximizar finalmente el rendimiento conjunto de todos ellos teniendo en cuenta sus interacciones.

El procedimiento es buscar un modelo que facilite la toma de decisiones y las estrategias para optimizar la gestión operativa de la Terminal. Resumiendo podemos definir las siguientes intenciones:

El *Objetivo* es desarrollar un modelo.

El *Propósito* es conseguir una herramienta que ayude a la toma de decisiones y estrategias operativas.

La *Finalidad* es maximizar el rendimiento de la Terminal de una manera dinámica, es decir en tiempo real de acuerdo a los flujos que el sistema suministre al modelo.

El *Alcance* es estrictamente el sistema operativo conjunto y su balance final, teniendo en cuenta sus costes y precios de mercado.

Las *Características* de este trabajo serán la creación de un modelo en base a criterios deterministas, probabilísticos y heurísticos.

1.4 Metodología

Este es un tema muy delicado, ¿es mejor la utilización de modelos matemáticos, de simuladores o el uso de modelos heurísticos basados en la experiencia? Aunque parezca un poco excesivo hagamos un repaso a la historia del método científico desde Platón y Aristóteles hasta las tendencias contemporáneas de la filosofía de la ciencia.

1.4.1 Historia del método científico^{29,30}

Fue Tales de Mileto quien inició el estudio de las causas de los fenómenos; Platón con su teoría de las ideas como entes universales, perfectos, reales y objetivos; Aristóteles con sus teorías sobre los silogismos, las definiciones, el método inductivo-deductivo y su teoría de la causalidad.

²⁹ Perez Tamayo, R. ¿Existe el Método Científico? : Historia y realidad. 1ª ed. México D.F.: El Colegio Nacional y Fondo de Cultura Económica, 1998. ISBN 968-16-5658-X.

³⁰ López P. El positivismo. El círculo de Viena. Karl Popper. Liceus. [en línea]. [Consulta: 31 de marzo 2005]. Disponible en:< <http://www.liceus.com/cgi-bin/aco/fil/02/2401.asp>>.

La edad media se caracterizó por diversas interpretaciones de las teorías de los clásicos, pero en general en Europa fue tiempo de oscuridad para el conocimiento salvo en el entorno de los monasterios y de la medicina.

Podemos decir que hasta el siglo XVI la ciencia formaba parte de la filosofía, es durante los siglos XVII y XVIII que se produce la revolución científica. Científicos como Galileo, Newton y Leibniz profundizan en el método científico y su teoría, la gran evolución de la ciencia con nuevas teorías y descubrimientos incide en el mundo de la filosofía y las humanidades y hombres como Bacon, Descartes, Locke, Hume y Kant, sin ser científicos, estudian y analizan la estructura de la ciencia. La filosofía además de interesarse por la ética, la estética, la lógica y la metafísica también se interesa por la epistemología y el método científico.

En el siglo XIX las dos corrientes predominantes fueron el empirismo y el positivismo, para estas dos tendencias y las que posteriormente se derivaron de ellas, el conocimiento científico es el paradigma de la objetividad y de la racionalidad.

Las corrientes de la filosofía de la ciencia en la última mitad del siglo XX tienen como antecedentes el empirismo y el positivismo que dieron paso a tendencias relacionadas entre sí como el empirismo lógico; el pragmatismo; el operacionismo; el positivismo lógico y los círculos de Viena y Berlín; el instrumentalismo; el subjetivismo selectivo; y el falsacionismo de Karl Popper que básicamente dice que una teoría nunca puede ser aceptada como válida aunque sí que se puede demostrar su falsedad por medio de los hechos.

Por último las tendencias contemporáneas, entre las que destacaremos a Imre Lakatos y su teoría de los programas de investigación, donde se contrastan dos teorías y unos hechos, como consecuencia una de las teorías predice hechos no anticipados por la otra teoría que es descartada; Thomas Kuhn y el relativismo histórico, según el cual toda ciencia ha pasado por tres fases una de preciencia donde se van acumulando hechos y resultados, un segundo ciclo de ciencia normal donde se construyen las teorías y por último cuando las anomalías acumuladas desmontan las teorías vigentes, este último periodo es el de revolución; por último Paul Feyerabend y el anarquismo, creo que los títulos de sus dos obras principales explican por sí solos su teoría, *Contra el método* y *La ciencia en un mundo libre*. En cualquier caso lo podemos considerar un autor tan interesante como peligroso por razones obvias.

En resumen podemos decir que históricamente ha habido cuatro corrientes de pensamiento en relación al método científico:

Método inductivo-deductivo. Su esquema se basa en observaciones a partir de las cuales por vía inductiva se generan unas hipótesis que por vía deductiva se convierten en teorías.

Método a priori-deductivo. Existen unos principios generales o axiomas invariantes y eternos a partir de los cuales se deducen unas teorías que pueden o no ser demostradas objetivamente.

Método hipotético-deductivo. Existen unas hipótesis previas que son comprobadas por las observaciones posteriores.

Método no al método. Esta teoría viene a decir que nunca ha habido método o reglas en la investigación científica. Por otro lado admite que en la actualidad es tal número ciencias existentes, que determinan que no exista un método único sino muchos métodos distintos.

1.4.2 ¿Qué es el método científico?

Toda ciencia se propone *probar que una cosa es*, mediante el método histórico. Después averiguar *la naturaleza* de la cosa esto es, su definición (esencia) y descripción (accidentes). El objetivo principal de la ciencia es averiguar *el porqué*, es decir la causa y por último el *para qué* una cosa es.

Debemos distinguir entre métodos formales y métodos empíricos. Las ciencias formales persiguen la consistencia del pensamiento interno, es decir que sus proposiciones estén relacionadas de acuerdo o en conformidad con ese pensamiento interno (*adecuatio intellectus cum se*). Las ciencias empíricas tienen como objetivo determinar las leyes o proposiciones de validez general que relacionan pensamiento y realidad (*adecuatio intellectus et rei*)³¹.

Uno de los logros más importantes de la ciencia ha sido separar las proposiciones positivas, de las normativas. Las primeras se refieren a “lo que es”, es decir tenemos la posibilidad de contrastar nuestras proposiciones con la realidad y rechazarlas, modificarlas o aprobarlas en función del grado adecuación a los hechos. Mientras que las segundas se refieren a lo que “debe ser”, es decir son *juicios de valor* y una llamada a la realidad no hará coincidir proposiciones contrapuestas sobre un mismo objetivo.

Es importante distinguir entre proposiciones positivas y normativas, el método científico como tal, solo entiende de lo positivo, es decir de lo científicamente demostrable mediante la confrontación de los hechos. Por otra parte la lógica nos dice que no es posible deducir proposiciones de carácter positivo a partir de proposiciones de carácter normativo y viceversa.

En cualquier caso, como decían unos amigos filósofos del profesor de Teoría Económica Richard G. Lipsey³² “*en el límite, la distinción entre lo positivo y lo normativo se oscurece y derrumba completamente*”.

Resumiendo, una teoría es un conjunto de definiciones y supuestos o hipótesis que por vía inductiva se deducen de la observación de unos hechos. Posteriormente por vía deductiva se construyen modelos que nos permiten predecir las implicaciones de los hechos observados en base a la hipótesis que queremos demostrar.

³¹Tarragó Sabaté. F. Iniciación a la Economía de la Empresa. 5ª ed. Barcelona: Editorial Hispano Europea, S.A. 1981, p. 11-31.

³² Lipsey, G. R. Introducción a la Economía Positiva. 10ª ed. Barcelona: Vicens-Vives, S.A., 1982, p. 5.

El siguiente paso es contrastar con la realidad la o las hipótesis que pretendemos demostrar, mediante un proceso de observación y análisis estadístico de los datos obtenidos. En este sentido hay teorías que podemos contrastar con experimentos de laboratorio y cuando esto no es posible hay que recurrir a la utilización de modelos.

En conclusión si la teoría es altamente consistente con la realidad y supera en definición y amplitud a otras teorías contrarias, diremos que la teoría es aceptada, caso contrario debe ser revisada o rechazada.

1.4.3 La metodología en las operaciones portuarias

La realidad operativa en el transporte multimodal es compleja y nunca mejor dicho, debido a la gran cantidad de variables y parámetros que intervienen en ella.

Aún teniendo en cuenta todas estas variables y parámetros, el modelo nunca será un fiel reflejo de esta realidad compleja, aunque sí se pueden sentar las bases para una toma de decisiones más objetiva y sistematizada (consistente) que mejore la eficiencia.

En el entorno de las operaciones portuarias y concretamente en el tráfico de contenedores, se manejan pocas variables deterministas y bastantes variables aleatorias, en consecuencia hay pocos sistemas deterministas³³ y muchos procesos estocásticos³⁴ respectivamente. Por ejemplo el rendimiento de una grúa depende de la habilidad del manipulante, de la distribución de los movimientos a lo largo del buque, de la estiba, de la estructura y tamaño del buque, de la habilidad del planificador al programar las secuencias de carga, de los manipulantes de tierra, de la habilidad del capataz, sobordista, confronta y bordos, de la meteorología, del tráfico de maquinaria, de la luz, etc., y aún así podemos tener dos escenarios idénticos y el rendimiento de la grúa variar notablemente por diferentes circunstancias digamos que de carácter psicológico.

Por todo ello las herramientas que podemos utilizar son muy variadas, desde la utilización de modelos heurísticos y matemáticos, hasta la utilización de simuladores.

Un modelo heurístico es una predicción basada en el conocimiento y la experiencia de un gran número de relaciones *causa – efecto*. Es decir es un modelo basado en la experiencia.

Un modelo matemático está basado en un sistema de ecuaciones con unas variables y unos parámetros que simulan el comportamiento del sistema que estamos analizando. Cuando el sistema opera en forma probabilística a través del tiempo estamos hablando de sistemas estocásticos.

Un modelo matemático puede ir desde un simple sistema de ecuaciones, un modelo de programación matemática (lineal, no lineal, dinámica, entera, problemas de transporte y

³³ Sistemas que se resuelven en base a unas variables con valores determinados.

³⁴ Sistemas que se resuelven en base a variables con valores aleatorios.

asignación, optimización de redes, teoría de juegos y análisis de decisiones, etc.), hasta procesos estocásticos con cadenas de Markov³⁵ o con aplicaciones de la teoría de colas.

La simulación es la herramienta más importante y al mismo tiempo más compleja y costosa a la hora de diseñar un modelo.

Se trata de desarrollar un modelo para un sistema estocástico, aunque algo más complejo que para una cadena de Markov o un sistema de líneas de espera. Se usan distribuciones de probabilidad para generar de manera aleatoria los distintos eventos que pueden ocurrir en el sistema real, por último el sistema corre para obtener un conjunto de resultados que serán posteriormente analizados para determinar la bondad del modelo.

En esencia para el diseño de un simulador debemos definir los siguientes bloques:³⁶

- Definir el sistema estocástico que pretendemos predecir. Por ejemplo una línea de espera.
- El reloj de la simulación que va registrando los diferentes eventos que pueden ocurrir en el sistema.
- El estado del sistema, es decir lo que nos informa del estado actual del sistema. Por ejemplo el número de clientes en el sistema pendientes de servicio.
- Identificar los eventos que cambian el estado del sistema. Por ejemplo la entrada o salida de clientes en el sistema.
- Un mecanismo que genere los diferentes eventos de forma aleatoria.
- Un mecanismo o fórmula que identifique la transición de estados.
- Un mecanismo que analice estadísticamente las observaciones o resultados de las distintas simulaciones.

Principales características de la simulación: Flexibilidad; análisis de situaciones complejas; se puede utilizar cualquier distribución de probabilidad definida por el usuario; proyección en el tiempo; dar respuesta a ¿Qué pasa si...?; permite analizar la interactividad de todos los componentes del sistema; la simulación no genera soluciones óptimas, sino que es un sistema de prueba y error que permite presentar lo que sucede en el sistema según los diferentes escenarios que escojamos; un modelo de simulación es único, es decir es como un traje a medida para un determinado problema y por consiguiente es costoso.

Por último podemos dividir las simulaciones en dos grupos, las de eventos discretos y las de eventos continuos.

*“En las simulaciones de eventos discretos, los cambios de estado ocurren de manera instantánea en puntos aleatorios del tiempo como resultado de la ocurrencia de eventos discretos. En una simulación continua los cambios en el estado del sistema ocurren continuamente en el tiempo.”*³⁷

³⁵ Cálculo de Probabilidad de que suceda una determinada cadena de eventos.

³⁶ Hillier, FS.; Lieberman, G.J.; Investigación de Operaciones. 7ª ed. MÉXICO D.F.: McGraw-Hill Companies, 2002, p. 1084-1085

³⁷ Hillier, FS.; Lieberman, G.J.; Investigación de Operaciones. 7ª ed. MÉXICO D.F.: McGraw-Hill Companies, 2002, p. 1086.

En resumen, por razones de tiempo, simplicidad y coste, siempre que sea posible se utilizará un modelo analítico para “visualizar” las predicciones del modelo y solo cuando su grado de complejidad lo requiera se utilizará una simulación.

1.4.4 Diseño del Modelo y su Justificación

Este trabajo se justifica por la necesidad de homogenizar la gran cantidad de métricas que se utilizan en el entorno de las operaciones portuarias en especial considerar a los diferentes procesos como un Sistema Operativo conjunto donde la prioridad es optimizar el todo y no cada uno de los procesos individualmente. En este sentido consideramos que la organización de la explanada es el pulmón de todos los procesos y en consecuencia de la optimización del Sistema en conjunto.

Para contrastar nuestras teorías con la realidad utilizaremos modelos ante la imposibilidad de hacerlo en laboratorio para ello abordaremos tres campos de actuación, los trabajos científicos e informes técnicos producidos, análisis de los Sistemas Operativos existentes y un trabajo de análisis empírico de los procesos.

En esta Tesis se pretende maximizar el beneficio mediante el control del nivel de producción manteniéndolo entre los Umbrales de Producción, Beneficio y Punto de Equilibrio. Para ello utilizaremos modelos matemáticos que alimentaremos con las variables de producción ajustando su sensibilidad mediante los parámetros del Sistema Operativo. Teniendo en cuenta que las variables vienen dadas por el mercado es decir, el tráfico en sus diversas formas como número de buques, camiones, trenes y en especial el número de TEUS³⁸ manipulados, la única posibilidad es actuar sobre ciertos parámetros en especial sobre las estancias de los contenedores y homogeneidad de la estiba además de optimizar los recursos disponibles en tiempo real.

Estos modelos matemáticos y en especial sus parámetros se basan en datos empíricos y el conocimiento heurístico de cómo se comportan los diferentes procesos y el Sistema en conjunto.

Como hemos dicho en el apartado anterior también es posible crear un simulador o un emulador. Pero esta es una opción que dejaremos para futuras investigaciones en especial para un equipo multidisciplinar.

³⁸ Unidad equivalente a un contenedor de veinte pies.

ANALISIS DE MODELOS

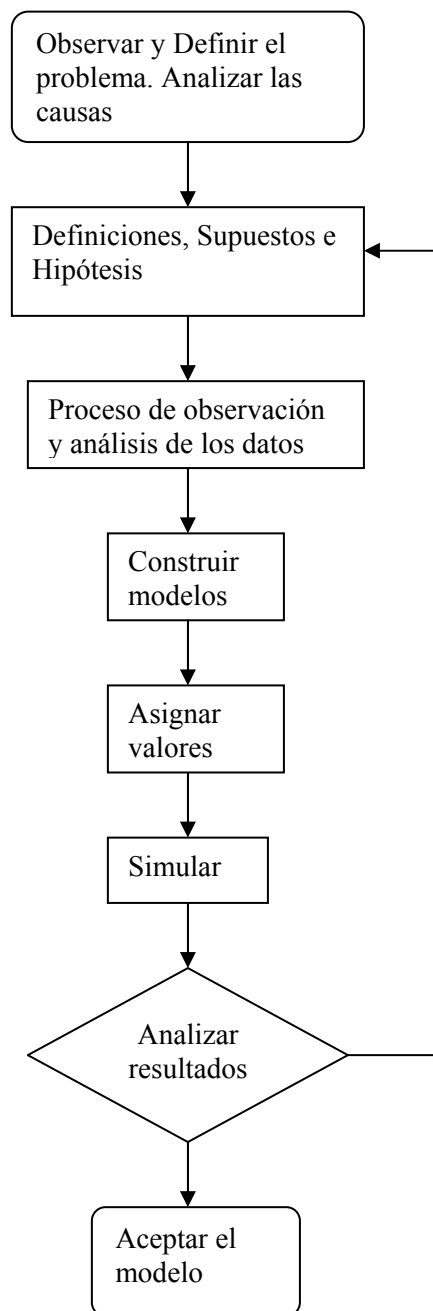


Figura 1 Construcción y elección del modelo^{39, 40}

³⁹Heizer, J.; Render, B.; Dirección de la Producción. Decisiones Tácticas. 4ª ed. Madrid: Prentice Hall Iberia, 1997, p.91-109.

⁴⁰Lipsey, G. R. Introducción a la Economía Positiva. 10ª ed. Barcelona: Vicens-Vives, S.A.1982, P. 3-56.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Área de actuación

Este apartado pretende describir la evolución de la operativa portuaria y su entorno, no solamente desde los inicios de las terminales de contenedores como tales, sino buscar en otras fuentes como el nacimiento de la investigación operativa y la evolución del mismo contenedor desde sus inicios como embalaje hasta su estatus actual de vehículo dentro del transporte multimodal, consiguientemente el área de actuación, será la investigación operativa ceñida a la operativa portuaria de contenedores y en consecuencia debemos buscar cuatro tipos de antecedentes, 1) la aparición del Contenedor, como sujeto principal de lo que hoy se llama transporte multimodal, 2) cambios en la Infraestructura portuaria y del transporte, 3) la Investigación Operativa como herramienta principal y su metodología, 4) finalmente buscar aportes en el área de Operaciones en Terminales de Contenedores Portuarias.

Antes de la aparición de los buques especializados la operativa portuaria se desarrollaba de forma artesanal. Con la aparición de los buques especializados (petroleros, gaseros, quimiqueros, *bulkcarriers*, *carcarriers* y portacontenedores) las operaciones de carga y descarga han pasado a ser una etapa más del proceso industrial. Este cambio requiere grandes inversiones no solo en los nuevos tipos de buques sino también en su entorno operativo, es decir las terminales dónde operan estos buques, los medios de que deben disponer las autoridades portuarias y la administración en general.

2.2 Antecedentes del contenedor como vehículo

El conocimiento de la Historia es necesario para analizar el presente y poder realizar hipótesis y teorías con fundamento y consistencia. Dicho lo cual, seguiremos con un resumen de la evolución del contenedor, desarrollo del transporte combinado y homogenización de las normativas a nivel internacional.

2.2.1 Desarrollo del contenedor como vehículo de transporte

El contenedor tal y como lo conocemos hoy en día tubo sus inicios en Roma en el año 1928 con motivo de la celebración del *Congreso Mundial del Automóvil*. Hasta entonces se habían venido utilizando para algunos transportes puerta a puerta, los llamados jaulones y los *cadres*, que son los antecedentes inmediatos del contenedor, aunque de vida limitada evitaban el embalaje individual, pero no permitían su utilización reiterada como equipo de transporte.

Durante este Congreso se coincidió en la necesidad de la existencia de un organismo que armonizase la normalización del contenedor a nivel internacional, en consecuencia se decidió la creación del *Comité Internacional de los Contenedores*. Posteriormente se han creado otras organizaciones internacionales (por ejemplo en 1933 se creó el *Buró Internacional de los Contenedores*) especializadas en el transporte combinado, a las que más adelante se hará referencia, así como la incorporación de otras ya existentes que también se involucraron en su estudio, desarrollo y normalización.

El uso generalizado del contenedor es a partir de 1965, en que el parque europeo era de aproximadamente 350.000 unidades. Se utilizaba principalmente para el transporte combinado ferrocarril-carretera en servicios puerta a puerta, posteriormente su uso se extendió al transporte marítimo, cuyas características particulares requieren importantes inversiones a nivel de economías de escala¹.

2.2.2 Definición del transporte combinado

La *Comisión Económica para Europa* (UNECE)² de las Naciones Unidas es un organismo en dependencia del Consejo, cuyo objetivo principal es la creación de un forum de comunicación que facilite la creación de instrumentos legales a nivel internacional que ayuden a desarrollar el comercio y el transporte de manera sostenible.

El *Comité de Transportes Interiores* (ITC) de la UNECE ha jugado un papel fundamental a la hora de coordinar estudios, procedimientos y definiciones de los términos relacionados con el transporte combinado. En reunión celebrada en 1963 por el *Grupo de Trabajo de los Transportes Combinados* del ITC se inician estos estudios coordinadamente con otros organismos internacionales, posteriormente el *Comité de Transportes Interiores* de la ECE adoptó las siguientes definiciones³ en la reunión de enero de 1966 y en base al informe presentado en 1965 por este Grupo de Trabajo en Munich:

Transporte combinado.- Transporte de mercancías, efectuado en un mismo equipo de transporte, que utiliza sucesivamente varios modos de transporte.

Transporte mixto.- Transporte que se efectúa bajo un mismo documento o título de transporte y que utiliza sucesivamente varios modos de transporte. Se diferencia del anterior en que aunque se utilizan varios modos el transporte no se efectúa en un mismo equipo.

¹ Consejo Superior de Transportes Terrestres. Transportes Combinados. Madrid: MOP, 1967. depósito legal M. 17580. P. 32-81.

² UNECE. United Nations Economic Comisión for Europe. Transport Division. [en línea]. [Consulta: 15 de abril 2005]. Disponible en: <http://www.unece.org/trans/presentTransDiv.html>

³ Consejo Superior de Transportes Terrestres. Transportes Combinados. Madrid: MOP, 1967. depósito legal M. 17580. P. 1-7.

Modo de transporte.- Conjunto de técnicas (carga general, container, granel, etc..) que utilizan vías de transporte de la misma naturaleza (carretera, ferrocarril, aéreo, marítimo, fluvial y oleoductos).

2.2.3 Evolución de la normalización

El equipo y sistemas utilizados en el transporte combinado presentaba inicialmente una serie de problemas en el contexto del tráfico internacional, viendo las ventajas que estos sistemas presentaban a nivel nacional se trataba de poderlos aplicar internacionalmente unificando criterios en cuanto a obstáculos legales y administrativos, medidas, pesos, diseño estructural y tipos de anclaje para su manipulación, teniendo como objetivo que estos equipos pudieran ser utilizados en los diferentes países por diferentes modos de transporte y tipos de manipulación.

Para poder llevar a cabo esta cooperación se involucraron diversas organizaciones internacionales especializadas dentro del marco general de la evolución técnica del transporte, de los embalajes y de la manipulación de las mercancías:

Comité de Transportes Interiores de la Comisión Económica Europea

El Comité de Transportes Interiores (ITC) de la ECE es desde 1947 el responsable de coordinar el Plan de Acción de la ECE para el desarrollo de los transportes y en consecuencia de coordinar e impulsar la cooperación intergubernamental y con otras organizaciones implicadas en el estudio y desarrollo del transporte combinado.

Para ello se crearon dentro del ITC diferentes grupos de trabajo tanto a nivel europeo como mundial⁴:

- *The Working Party on Road Transport*
- *The Working Party on Road Traffic Safety*
- *The Working Party on Rail Transport*
- *The Working Party on Inland Water Transport*
- *The Working Party on Combined Transport*
- *The World Forum For Harmonization of Vehicles Regulations*
- *The Working Party on Customs Questions affecting Transport*
- *The Working Party on the Transport of Dangerous Goods*
- *The Working Party on Transport of Perishable Foodstuffs*
- *The Working Party on Trends and Economics*
- *The Working Party on Transport Statistics*

Como se ha dicho en el apartado anterior este Comité ha intervenido muy activamente en la armonización y desarrollo de la normativa internacional del transporte combinado.

⁴UNECE. United Nations Economic Comisión for Europe. Transport Division. [en línea]. [Consulta: 15 de abril 2005]. Disponible en: < <http://www.unece.org/trans/main/itc/itc.html> >

La Conferencia Europea de Ministros de Transporte (CEMT)⁵

Esta organización intergubernamental se creó por el Protocolo de Bruselas del 17 de octubre de 1953. Es un forum compuesto por los ministros de transporte de los respectivos Gobiernos firmantes y su objetivo es el desarrollo racional de las infraestructuras y de los transportes interiores de interés internacional.

Se han creado varios grupos y comités de especialistas para estudiar y fomentar los transportes combinados, sus funciones principales eran y son:

- Ofrecer un forum para el análisis y discusión de los proyectos para el transporte de todos los estados miembros. El desarrollo de la forma más racional y eficiente, de los sistemas de transporte europeos de interés internacional. Teniendo en cuenta los más altos estándares de seguridad, medio ambiente y dimensión social.
- La coordinación fomento y estímulo de trabajos entre los diferentes Gobiernos miembros y de otras organizaciones internacionales especializadas, al mismo tiempo ayudar a construir un enlace entre los países de la UE y el resto de países europeos a nivel de política de transporte.

Destaca la resolución tomada en el año 1957, en Roma por el Consejo de Ministros de Transportes de la CEMT⁶, *“llamada de atención de los países representados en la Conferencia sobre la gran importancia que tiene la resolución de los problemas de los contenedores, las paletas y los transportes de vehículos de carretera sobre vagones de ferrocarril, con vistas a aumentar la productividad del conjunto de los transportes y mejorar su calidad, reducir el coste de los embalajes y del almacenado, proteger las mercancías y facilitar y acelerar el trasbordo”*.

Posteriormente en 1967 esta otra resolución en la que la CEMT *“se compromete a tratar de eliminar, o reducir en lo posible, los obstáculos legales y administrativos y a fomentar los trabajos de investigación y normalización”*.

Cámara de Comercio Internacional (CCI)⁷

La Cámara de Comercio Internacional nace en 1919 con un objetivo que no ha cambiado a lo largo de todos estos años: Servir al mundo de los negocios, promoviendo el comercio y la inversión, abriendo nuevos mercados y favoreciendo el libre flujo de capitales. Cumpliendo con estos objetivos ha promovido varias reuniones y arbitrajes⁸

⁵ ECMT. European Conference of Ministers of Transport. [en línea]. [consulta: 17 de abril de 2005]. Disponible en: < <http://www1.oecd.org/cem/about.htm> >

⁶ Consejo Superior de Transportes Terrestres. Transportes Combinados. Madrid: MOP, 1967. depósito legal M. 17580. P. 1-7, 70-73

⁷ ICC. International Chamber of Commerce. The World Business Organization. [en línea]. [consulta: 17 de abril de 2005]. Disponible en: < http://www.iccwbo.org/home/menu_what_is_icc.asp >

⁸ Desde 1999 el promedio es de más de 500 por año.

entre asociaciones de usuarios y transportistas para la solución de problemas que impedían el desarrollo de las nuevas técnicas de transporte, sobretodo en lo referente a paletas y contenedores.

Entre los acuerdos destaca el que se logró sobre el marcado y calidad de las maderas utilizadas en las paletas del *pool* europeo en octubre de 1960 y marzo de 1961, y la encuesta que en 1965 se realizó sobre la adopción de la paleta-caja europea. Entre las normas y estándares destacar los *ICC's Uniform Customs and Practice for Documentary Credits (UCP 500)* que utilizan los bancos para financiar millones de dólares del comercio, las ICC Incoterms son las definiciones estándar más usadas en los contratos de comercio internacional, por último decir que el ICC también es pionero en la regulación del *e-commerce* y que sus códigos sobre publicidad y marketing se reflejan con frecuencia en las diferentes legislaciones a nivel nacional⁹.

*Buró Internacional de los Contenedores (BIC)*¹⁰

Como ya se ha dicho en el párrafo 2.2.1 esta organización no gubernamental fue fundada por la Cámara de Comercio Internacional (CCI) en 1933 para mejorar el desarrollo del transporte combinado y en especial del Contenedor. En estrecha colaboración con otras organizaciones internacionales especialmente ISO, CCI y UNECE. Además está en contacto con todas las partes que intervienen en el tráfico de contenedores, es decir armadores, operadores logísticos, transitarios, consignatarios, cargadores, etc. Según la norma ISO 6346 el BIC asigna los códigos de propietario para contenedores internacionales, mediante su registro oficial en el “CONTAINERS BIC CODE”.

*La Unión Internacional de Ferrocarriles (UIC)*¹¹

Fundada en 1922 es una asociación internacional que agrupa y representa a nivel mundial a las empresas ferroviarias, a las que gestionan sus infraestructuras y otras con actividades complementarias en el entorno del ferrocarril. En 1933 publicó la primera ficha con el objetivo de normalizar el contenedor en el contexto del transporte combinado. Posteriormente ha publicado numerosas fichas sobre las características del contenedor con el fin de armonizar su desarrollo con otras organizaciones internacionales. Estas fichas se proponen normalizar dimensiones, especificaciones

⁹ ICC. The Committee on Maritime Transport. [en línea]. [consulta: 14 de marzo 2005]. Disponible en: < http://www.iccwbo.org/home/transport/maritime_transport_committee.asp >

¹⁰BIC. Bureau International des Containers et des Transports Internationaux. [en línea]. [consulta: 12 de febrero de 2005]. Disponible en: < <http://www.bic-code.org/html-fr/presentation.html> >

¹¹ UIC. International Union of Railways. Combined Transport. [en línea][consulta: 20 de marzo 2005]. Disponible < <http://www.uic.asso.fr/tc/> >

técnicas, condiciones de homologación y tarifas de las paletas y contenedores que se utilizan en el tráfico internacional.¹²

*La Organización Internacional de Normalización (ISO)*¹³

La ISO es la organización que en la actualidad tiene más peso no solamente en el caso de la normalización de equipos para el transporte combinado sino para todo tipo de normalización industrial.

Los trabajos de normalización en materia de equipos utilizados en los transportes combinados se han venido desarrollando a través de sus comités técnicos TC-51 y TC-104 para paletas y contenedores respectivamente.

Los primeros contenedores utilizados en el transporte marítimo por Sealand tenían 35 x 8 x 8 pies y sirvieron de base para posteriores normalizaciones¹⁴.

En 1968 fue la primera¹⁵ organización en definir el contenedor a nivel internacional, posteriormente renovó esta definición con la norma ISO 830-1981 y siguientes.

ISO 830-1981	Series 1 freight containers - Classification, dimensions and ratings
ISO 668-1988	Freight containers – Terminology
ISO 830-1981/1984	Amendment 1984
ISO 830-1981/1988	Amendment 1988
ISO 1161-1984	Series 1 freight containers – Corner fittings - Specification
ISO 1496-1:1990	Series 1 freight containers – Specification and testing – General cargo
ISO 1496-2:1988	Series 1 freight containers – Specification and testing – Thermal containers
ISO 1496-3:1991	Series 1 freight containers – Specification and testing – Tanks for liquids, gases and pressurized dry bulk

¹² Consejo Superior de Transportes Terrestres. Transportes Combinados. Madrid: MOP, 1967. depósito legal M. 17580. P. 5-7 y 37-41.

¹³ ISO. International Organization for Standardization. [en línea]. [consulta: 20 de enero de 2004]. Disponible en: < <http://www.iso.org/iso/en/ISOOnline.frontpage> >

¹⁴ Chadwin, M.L. [et al.]. Ocean Containers Transportation: An Operational Perspective. New York: Taylor & Francis, 1990. P. 1-20.

¹⁵ Monfort A. [et al.]. Terminales marítimas de contenedores: El desarrollo de la automatización. 1ª ed. Valencia: IPEC (Fundación Instituto Portuario de Estudios y Cooperación de la Comunidad valenciana), 2001. P.17-24.

ISO 1496-4:1991	Series 1 freight containers – Specification and testing – Non pressurized for dry bulk
ISO 1496-5:1991	Series 1 freight containers – Specification and testing – Platform and platform – based containers
ISO 1496-6c:1977	Series 1 freight containers – Specification and testing – Platform based containers, open sided, with complete superstructure
ISO 2308-1972	Hooks for lifting freight containers up to 30 tonnes capacity – Basic requirements
ISO 3874-1988	Series 1 freight containers – handling and securing
ISO 3874-1988/1990	Amendment 1:1990
ISO 6346-1984	Freight containers – Coding, identification and marking
ISO 6346-1984/1988	Amendment 1:1988
ISO 8323-1985	Freight containers – Air/surface (intermodal) general purpose containers – Specifications and tests
ISO 9669-1990	Series 1 freight containers – interface connections for tank containers
ISO 9339-1990/1992	Amendment 1:1992
ISO 9711-1:1990	Freight containers – Information related to containers on board vessels – Bay plan system
ISO 9711-2:1990	Freight containers – Information related to containers on board vessels – Telex data transmission
ISO 9897-1:1990	Freight containers – Container data exchange (CEDEX) – General communication codes
ISO 9897-3:1990	Freight containers – Container data exchange (CEDEX) – Message types for electronic data interchange
ISO 10368-1992	Freight thermal containers – remote condition monitoring
ISO 10374-1991	Freight containers – Automatic identification

Tabla 1 Normas ISO para contenedores¹⁶

Evidentemente la normalización sigue evolucionando de acuerdo a las nuevas tecnologías y necesidades y siguen apareciendo normas ISO que regulan el contenedor su manipulación seguimiento y control.

Actualmente todo tipo de contenedor utilizado en tráfico combinado sigue la normativa ISO teniendo cada uno de ellos una identificación unívoca del tipo y características del contenedor (norma ISO 6346), a modo de ejemplo la siguiente tabla muestra los códigos utilizados según tipo y tamaño. Para cada tipo citaremos los códigos más usuales

¹⁶ ISO Standards Handbook: Freight Containers. 3ª ed. Geneva: ISO, 2000. ISBN 92-67-10177-3

teniendo en cuenta que, primero se indica el código antiguo y a continuación el actual, debido a que todavía circulan contenedores con el código anterior.

Observaciones	Código ISO 20'	Código ISO 40'
Cerrado carga general 8'	2010/20G1	4010/40G1
Cerrado, carga general 8'6''	2210/22G1	4310/43G1
Frigorífico	2232/22R1	4332/43R1
Open top	2250/22U1	4350/43U1
Flat rack	2260/22P1	4360/43P1
Cubas	2270/22T1	4370/43T1
Cerrado carga general 9'HQ	2410/24G1	4410/44G1
Cerrado carga general 9'6''HQ	2510/25G1	4510/45G1
Cerrado carga general extra ancho (PW)	2CG1	4CG1
Cerrado carga general HQ (9') PW	2DG1	4DG1
Cerrado carga general HQ (9'6'') PW	2EG1	4EG1
Cerrado carga general HQ (>9'6'') PW	2FG1	4FG1

Tabla 2 ISO 6346, códigos identificativos por tipo de contenedor¹⁷

Significado de los dígitos:

- Primer dígito equivale a las decenas de longitud en pies.
- Segundo dígito a la altura combinado con el ancho.
- El tercer dígito al tipo de contenedor, cerrado, plataforma, frigorífico, etc.
- El cuarto dígito se refiere a características especiales como tipo de mampara en plataformas, tipo de cuba, etc.

Por último citar otras asociaciones u organizaciones que también colaboraron o colaboran en el desarrollo del transporte combinado:

- La Unión Internacional de Transportes por Carretera (IRU)
- La Unión Internacional de Navegación Fluvial (UINF)
- La Federación Internacional de Asociaciones de Transitarios (FIATA)
- El Consejo de Federaciones Industriales de Europa (CIFE)
- La International Cargo Handling Coordination Association (ICHCA)
- La Asociación Internacional para el Transporte Aéreo (IATA)
- La Organización para la Cooperación de los Ferrocarriles de los Países del Este (OSJD)
- World Customs Organization and Conventions (WCO)
- American Standard Association (ASA)
- American National Standards Institute (ANSI)

¹⁷ Elaboración propia.

- La Dirección General de Transportes de la Comunidad Económica Europea. Actualmente Dirección General para la Energía y el Transporte de la Unión Europea.

2.2.4 Revolución en el transporte marítimo

Todo empezó en North Carolina con la Mclean Trucking Co. en 1934¹⁸ en plena depresión económica americana, la empresa de transportes creada por Malcom Mclean con un solo camión de segunda mano, y que veinte años más tarde era la segunda empresa de transportes por carretera más importante de los EE.UU.

Para Mclean las demoras que se producían durante la transferencia de las mercancías entre camión, tren y buque, eran excesivas. En 1954 anunció su proyecto de mover las mercancías en contenedores del mismo tamaño que un remolque y que pudieran ser intercambiados entre los diferentes modos de transporte. Anteriormente había habido intentos similares con cadres y conex que no llegaron a fructificar salvo en algunos sectores debido a la fragilidad de estos embalajes y a que no podían ser utilizados repetidamente para cualquier tipo de mercancía.

Mclean vendió su empresa de camiones y compró la Pan-Atlantic Steamship Co. que en 1959 se convirtió en Sealand Service Inc.

El 26 de abril de 1956 es la fecha histórica en que el “Ideal X” un petrolero de la Segunda Guerra Mundial, fue transformado para poder transportar contenedores en su cubierta, zarpando de Port Newark con destino a Houston con 58 contenedores bien trincados en su cubierta. Fue el inicio de la containerización.

Las grandes navieras americanas (Sea-Land, Lykes y United States Lines) fueron las primeras en introducir la explotación masiva del contenedor en el tráfico marítimo de mercancías del Atlántico Norte¹⁹. Esto se produce a partir de 1966, en buques de carga general, formando parte los contenedores de la carga normal del buque. A partir de este año comienza la construcción de buques Portacontenedores puros, el contenedor pasa de ser considerado como <<embalaje>> a <<vehículo>> y pieza fundamental de una cadena de transportes usando modos diferentes.

Los primeros buques portacontenedores puros que llegaron a Europa fueron el *American Race*, en marzo de 1966, de la United States Lines, y el *Fairland*, en abril de 1966, de la Sea-Land.

¹⁸Marshall, S.G. Containerization First “Tipping Point”: The Fall of the New York Port. 1965-1975. 6 de Octubre 2001. [en línea] [consulta: 18 de abril 2005]. Disponible en: <<http://www.gothamcenter.org/festival/2001/confpapers/marshall.pdf>>

¹⁹Consejo Superior de Transportes Terrestres. Transportes Combinados. Madrid: MOP, 1967. depósito legal M. 17580. P. 64-88.

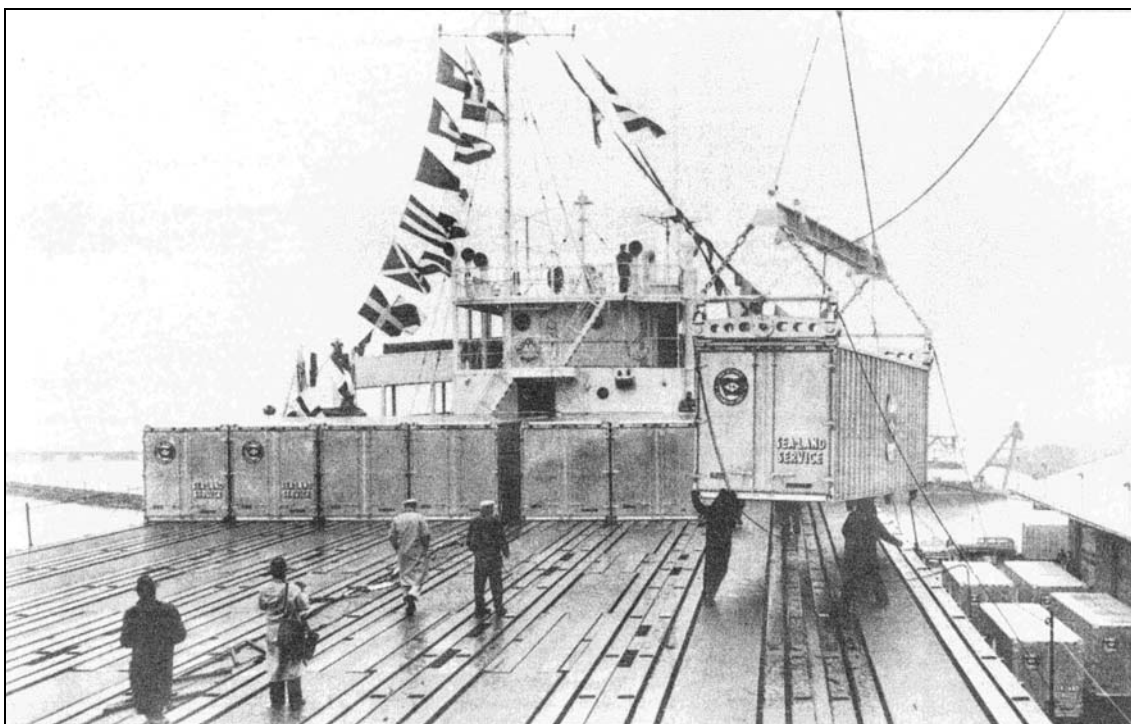


Foto 11 El Ideal-X en su histórico primer viaje en Port Newark, abril de 1956²⁰

Un buque Portacontenedor viene a costar un 50 % más que un buque normal²¹ con la misma capacidad de carga, y necesita asimismo un 50% más de espacio para llevar la misma carga. Sin embargo este mayor coste y espacio necesario se compensa, con creces, por la mayor eficiencia de estos buques especializados. Por ejemplo un buque de Carga General tardaría actualmente unos cuatro días para realizar una operativa de 6.000 toneladas (aproximadamente 300 contenedores) de descarga / carga, mientras que un celular puede hacerlo en doce horas (en ambos casos con una sola mano²²). Esto significa una mejor rotación de los buques y como consecuencia una mayor productividad y una reducción en los costes variables de explotación (Gastos de Escala).

Una medida de la eficiencia en la explotación del buque es la cantidad de días de mar por viaje redondo, por ejemplo un buque portacontenedores con rotación *ORIDES*²³ está un 74% del tiempo en la mar, en el caso de una rotación *MAIN*²⁴ un 81% de tiempo

²⁰ Fuente: Diario Marítimas

²¹ *BOXSHIP. BOXSHIP 2001. The Evolution of the Container Ship. Trinity House, Tower Hill, London EC3. May 2001.*

²² Equipo de estibadores o cuadrilla con diferentes especialidades que operan con una grúa.

²³ *ORIGIN TO DESTINATION*

²⁴ Operar con puertos base desde donde se distribuyen los trasbordos

en la mar. Si comparamos con buques que operen Carga General estamos hablando de un 42% en los casos más favorables²⁵.

Los buques portacontenedores tienen bodegas con estructura celular, es decir tienen unas guías verticales o raíles para contenedores de veinte o cuarenta pies, teniendo capacidad de apilamiento de hasta catorce alturas por diecisiete de manga en los VLCS (*Very Large Container Ships/Post Panamax*) estos buques especializados suelen tener una capacidad de entre 4000 y 6600 TEUS, velocidades de alrededor de 24 nudos en régimen económico, durando una travesía Rotterdam - New York 5,5 días, sus operativas tienen una media de 1500 TEUS por escala, con una duración de 20 horas con 3 manos seguidas.

	ESLORA	CALADO	TEUS	ROWS
FEEDER	100	6-7	100-499	<7
FEEDER MAX	150	8	500-999	7-10
HANDY	180--->200	10	1000-1999	11
SUB-PANAMAX	210--->230	12	2000-2999	12
PANAMAX	250--->270	12.4	>3000	13
POST-PANAMAX (VLCS)	285--->350	>13	>4000	14-20
SUPER-POST-PANAMAX (ULCS)	>350	>14	>8000	20-22
MALACCA MAX ²⁶	>400	MAX 21	12000-18000	>= 24

Tabla 3 Tipos de buques portacontenedores año 2006²⁷

²⁵ Lodder, O. Containerisation. 2003. Conferencia dada en la Terminal de Contenedors de Barcelona S.L. sobre los puntos clave para la contratación de una terminal portuaria por el armador, Barcelona 5 de mayo de 2003 [documento inédito de la presentación, Otto Lodder, Contract Manager P&O NEDLLOYD]

²⁶ En proyecto

²⁷ Elaboración propia



Foto 12 Estructura celular del Moreton Bay, Tilbury 1971²⁸

²⁸ © National Maritime Museum, London



Foto 13 Operativa del buque Sovereign Maersk de 6600 TEUS, trabajando con 4 grúas Post-Panamax y una Panamax²⁹

	ROWS	ALCANCE
FEEDER	10	28,5 m
PANAMAX	13	38 m
POST-PANAMAX-1	16	45-47 m
POST-PANAMAX-2	18	50-52 m
POST-PANAMAX-3	20	56 m
SUPER-POST-PANAMAX	22--->24	61m

Tabla 4 Tipos de grúas Portainer³⁰

Actualmente ya navegan algunos buques portacontenedores ULCS (*Ultra Large Container Ships/Super Post-Panamax*) con capacidades de entre 8000 y 10000 TEUS, si se tiene en cuenta la tendencia a la acumulación del tráfico en megapuestos de trasbordos para el tráfico oceánico (*Hub Ports*) y su posterior distribución mediante buques *feeder* y *handy* con capacidades entre 500 y 2000 TEUS, o bien por medio de grandes terminales ferroviarias construidas dentro de las mismas terminales marítimas. Por supuesto para el *Hinterland* la distribución básicamente es por camión.

²⁹ © A. P. Moller - ;Maersk A/S

³⁰ Elaboración propia

Los mayores buques que navegan en la actualidad (año 2007) son los *S-TYPE* (Post Panamax) de 6.600 TEUS y 17 *rows* de manga. Aunque existen algunos de 8.000 y 9.000 TEUS pero que no pueden ser considerados Super Post Panamax debido a que su manga no supera los 17/18 contenedores, en realidad estos buques pueden considerarse como una aberración operativa, ya que para conseguir tal capacidad deben aumentar su calado y su franco bordo a costa de mantener una manga de 17 TEUS, como consecuencia la maniobrabilidad se hace más dificultosa y la operativa de grúas más lenta y complicada.

En relación al párrafo anterior en un estudio publicado a principios del 2001 por la *Lloyd's register of Shipping* (LR)³¹ con la colaboración de la consultora naval *Ocean Shipping Consultants* se da respuesta a cual será el portacontenedor del futuro concretamente a medio plazo es decir entre tres y seis años vista, este buque tendrá una capacidad para 12.500 TEUS (contenedores de veinte pies equivalentes) que se considera la capacidad óptima dado el tráfico marítimo previsto teniendo en cuenta la futura red mundial de puertos.

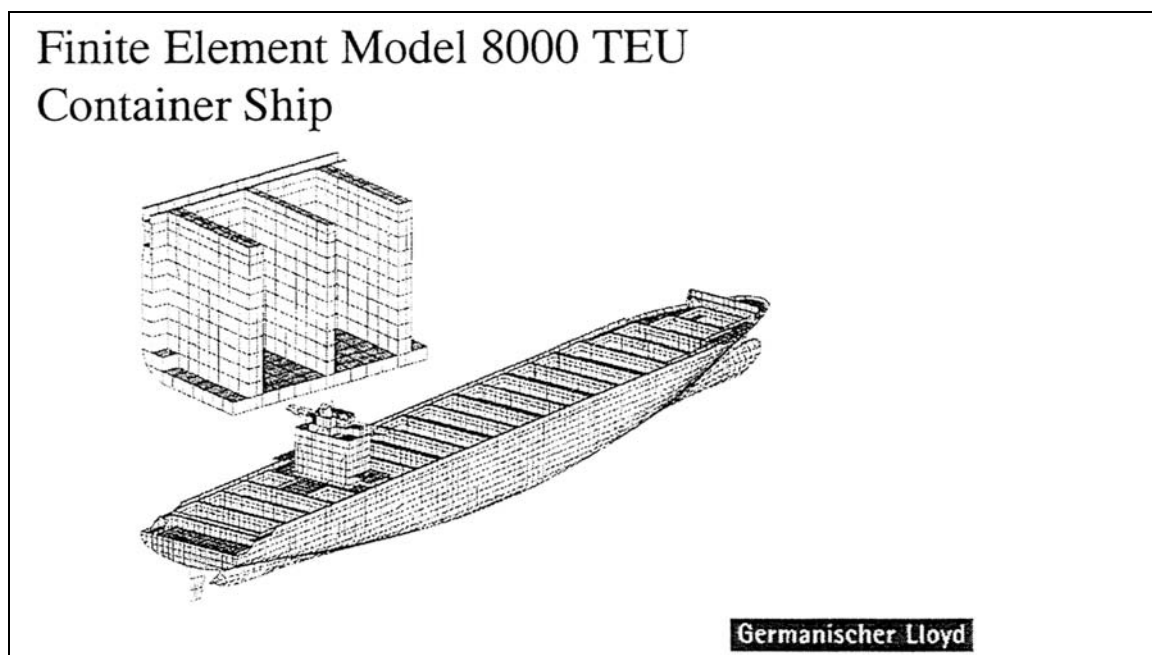


Figura 2 Cálculo por elementos finitos de la estructura de un ULCS de 8000 TEUS

Partiendo de este informe económico LR ha desarrollado un proyecto tipo de ULCS teniendo en cuenta todos sus aspectos estructurales de rendimiento y maniobrabilidad concluyendo que no hay obstáculos insalvables para el mismo salvo determinar cual será el medio de propulsión óptimo ya que en este estudio los resultados demuestran que los ULCS pueden alcanzar los 23,5 nudos de velocidad, pero a partir de los 10.000 TEUS sería necesario que llevaran una doble hélice para llegar a los 25 nudos lo que

³¹ Lloyd's Register. Leading the way in developing the optimum ultra large container ship. [en línea]. [consulta: 17 de julio de 2004]. Disponible en: < http://www.lr.org/market_sector/marine/ulcs.htm >

aumentaría su productividad aunque también y notablemente los costes fijos por combustible.

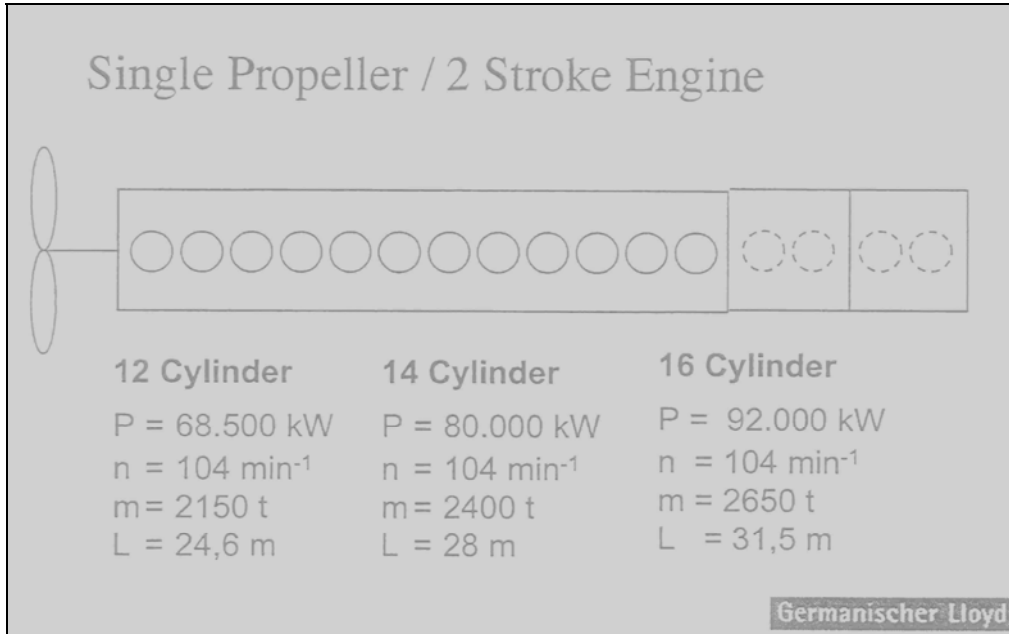


Figura 3 Máquina para 8000 TEU y 25 nudos de velocidad, para buques mayores o más de 25 nudos son necesarias dos máquinas o más de 12 cilindros.

No obstante se ha llegado a la conclusión de que los 23,5 nudos también pueden ofrecer unos ahorros marginales aceptables para los armadores de mayor volumen. Por último se menciona en el estudio que la aparición de estos ULCS de 12.500 TEUS es solo cuestión de tiempo y que antes finales del año 2009 ya se podrá contar con ellos.

2.3 Cambios en infraestructura portuaria y del transporte

2.3.1 Generalidades

La adaptación de un puerto y sus instalaciones a este nuevo tráfico requería sumas cuantiosas que por otra parte, no pueden ser amortizadas si no se cuenta con un volumen de tráfico importante y con un *Hinterland* competitivo a nivel de infraestructuras de comunicaciones y transporte así como de industrias que generen demanda.

Por ello el número de puertos que inicialmente se especializaron en esta técnica era relativamente pequeño, actualmente aunque son muchos los puertos con instalaciones capaces de absorber este tráfico, se prevé una reorganización de sus funciones debido a la tendencia de las grandes navieras a optimizar sus escalas, con la disminución de sus rotaciones mediante la selección de puertos en función de las potencialidades de sus *hinterlands* ó como puertos de trasbordo y organizar desde los mismos la distribución de las mercancías mediante *feeders*, navegación fluvial, ferrocarril y camiones. Se trata de optimizar los costes entre un mayor número de escalas, con sus costes asociados, ó reducir éstas a cambio de un mayor coste de distribución.

Los puertos debieron de invertir en la preparación de grandes explanadas capaces de soportar los contenedores en pilas de dos alturas en un principio y llegando en la actualidad a pilas de hasta nueve alturas, en función de la técnica de almacenaje y manipulación que se utilice. Para ello se debieron de preparar los terrenos para soportar tanto el apilamiento de los contenedores como para la circulación repetida de camiones y maquinaria pesada para la manipulación de las cargas, así como disponer de un mínimo de hectáreas para aparcamiento de los contenedores, zonas de conexión para containers frigoríficos, tinglados para consolidados y desconsolidados, es decir llenados y vaciados de los contenedores LCL³² (*less than one container load*), debidamente equipados con sistemas de seguridad antirrobo y control de temperaturas, líneas de atraque con calados y capacidad suficiente para absorber la demanda de las Líneas Regulares, actualmente una Terminal oceánica tipo estándar tiene una media de unos 1000 metros lineales de atraque y unos calados entre los 12 y 17 metros.

Además se requería renovar totalmente el parque móvil, adquiriendo grúas Portainer capaces de llegar en la actualidad a rendimientos de 30/60 movimientos por hora. Además de una maquinaria de soporte en explanada que según el tipo de operativa para el que se halla diseñado la Terminal podrán ser: *Straddlecarriers*, Carretillas Apiladoras (Frontales), *Transtainers* (sobre ruedas o sobre raíles), Tractoras, Plataformas, Chasis, Grúas Puente sobre estructuras fijas (*Over Head Bridge Cranes*) y *Reachstackers*, para la manipulación de contenedores, mercancías y BBC³³ (*break bulk cargo*), tanto en almacenes, explanada y terminal ferroviaria. Por último talleres para el mantenimiento de la maquinaria, equipos y estaciones frigoríficas.

³² un contenedor LCL esta compuesto por diferentes partidas de mercancías

³³ mercancía sin containerizar debido a su peso y/o volumen.

En la actualidad el sistema informático debe ser capaz de gestionar todos los procesos que intervienen en una Terminal de contenedores tanto en *tiempo real* (operaciones) como *on-line* (planificación, facturación, etc.).

Los paquetes dominantes son *COSMOS*³⁴ y *NAVIS*³⁵, existen además de otros paquetes *in-house* que las mismas terminales desarrollan a medida según sus necesidades.

Esencialmente son aplicaciones moduladas que permiten su utilización por áreas e independientemente del sistema informático (AS400, VAX, SPARC-SOLARIS, PC's, MAC,...) que utilice la terminal de contenedores.

Todas estas aplicaciones tienen un núcleo donde reside la base de datos llamado CTCS (*Container Terminal Control System*) que es quien controla y soporta la gestión operativa y administrativa de la terminal de Contenedores. Controla la gestión de actividades, órdenes de trabajo, introducción de datos y coordina los diferentes módulos. Además pueden trabajar sobre varias plataformas o sistemas operativos (OS400, WINDOWS, VMS, UNIX).

Los diferentes módulos se corresponden con los diferentes subsistemas operativos de la terminal de contenedores:

- Planificación Buque: Preparación de las secuencias de carga y descarga teniendo en cuenta las ubicaciones de los contenedores en explanada y buque.
- Planificación Explanada: prepara y asigna espacios para los diferentes flujos de contenedores.
- Comunicaciones: Envío y recepción de ficheros UN-EDIFACT³⁶ (BAPLIE, COARRI, CODECO, MOVINS, etc.)
- Web e-Terminal: Gestiona la información que requieren los clientes, de sus contenedores, buques, facturación etc.
- Almacén: Gestión de los llenados, vaciados, trasvases, entregas y recepción de mercancías sueltas.
- Gestión de la Maquinaria: Asignación de maquinaria en función de distancias, cargas de trabajo y tráfico de explanada, puertas y colas exteriores de camiones.
- Gestión de Puerta: Gestión mediante cámaras y sistemas de reconocimiento óptico (OCR) o por radiofrecuencia, que automatiza la actualización de datos en puerta.
- Facturación

³⁴ < <http://www.cosmos.be/> >

³⁵ < <http://navis.com/home.jsp> >

³⁶ < <http://www.unece.org/trade/untid/welcome.htm> >

Todos estos módulos trabajan independientemente a nivel de cálculo pero se comunican en tiempo real con el CTCS a nivel de datos, es decir toman los datos del núcleo para ejecutar sus procesos, pero una vez han ejecutado la orden actualizan la base de datos en el núcleo o CTCS.

2.3.2 Conveniencia de la containerización de las mercancías

La función principal del contenedor en el transporte de mercancías es conseguir tres objetivos: Entrega segura, rápida y lo más barata posible³⁷.

1º Entrega segura: Las mercancías containerizadas prácticamente quedan libres de averías y robos o por lo menos se reduce de forma importante la probabilidad de que esto ocurra al quedar exentas de manipulaciones intermedias en tierra y a bordo.

En el caso puerta a puerta sólo existen dos manipulaciones de las mercancías que son el llenado y el vaciado, mientras que esa misma operación en buques convencionales tendría al menos ocho manipulaciones como son: Carga y estiba en almacén, descarga y estiba en tinglados portuarios, traslado de tinglado a muelle, carga y estiba en bodegas del buque, desestiba y descarga en bodegas de buque, traslado de muelle a tinglado y estiba, carga y estiba en camión y desestiba y descarga en almacén.

2º Entrega rápida: Los buques portacontenedores reducen el tiempo de tránsito de las mercancías al ser su tiempo de operación más rápido y una variable mucho menos aleatoria, por lo que las escalas son de fecha teóricamente fija y si se estudian adecuadamente las necesidades de stock y los itinerarios se reducirá el periodo de inmovilización de las mercancías.

Se consigue también una mayor rapidez y facilidad para el despacho de aduanas, ya que se pueden habilitar como puerto de despacho puntos del interior del país, además de los fijos de las fronteras terrestres, marítimo y aéreo.

3º Lo más barato posible. Ahorro en embalajes, reduciendo el flete de un 10 a un 15%, otro beneficio económico representa el ahorro en derechos de aduanas y reducción de la prima del seguro.

El contenedor es el sujeto principal del transporte combinado sin él, habría que repetir las cargas, descargas, estibas y desestibas proporcionalmente a los modos de transporte que utilizados.

³⁷ Chadwin [et al.], 1990. Montfort [et al.], 2001.

2.3.3 La intermodalidad como elemento clave a los problemas de cuellos de botella en la distribución

La intermodalidad que comprende combinar el tráfico rodado, ferroviario, fluvial, cabotaje y gran cabotaje, como solución a los cuellos de botella en las áreas de distribución de los *hinterlands* con más densidad de tráfico rodado, necesita del impulso del *Short Sea Shipping*³⁸ (gran cabotaje) y de una mayor flexibilidad y liberalización del modelo ferroviario principalmente en las puertas del sur europeo dado el crecimiento previsto del tráfico de mercancías en las zonas de distribución más densas³⁹.

En este sentido podemos decir que en el futuro habrá dos tipos de puertos, los grandes portales (*Hub Ports*) y los de ámbito local, siendo necesario impulsar la modernización y ampliación de las infraestructuras necesarias tanto a nivel portuario, (vías de comunicación, accesos y zonas de aparcamiento) así como la infraestructura ferroviaria necesaria como trazados de ancho único y líneas de alta velocidad.

Tengamos en cuenta que por ejemplo en el puerto de Barcelona está previsto un aumento del tráfico de contenedores de manera que en el 2008 se llegue entorno a los 2.800.000 de TEUS lo que supone una circulación interna de 6.250 TEUS diarios y una intensidad de tráfico de 250⁴⁰ camiones a la hora.

El SSS según los estudios de la *Dirección General de Transporte y Energía de la Comisión Europea* (CE), se enmarca en la política europea para descongestionar el tráfico rodado y favorecer el medio ambiente. Estas actuaciones se reflejan en el Libro Blanco de la CE.

Como dato⁴¹ el tráfico de SSS es el único que ha crecido más que el rodado en la década de los noventa, concretamente un 27%, aunque conviene corregir algunos problemas que son la causa de que no se hayan conseguido los objetivos en su totalidad y adecuarlo a las necesidades actuales y previsión de futuro:

- La complejidad documental que precisan los usuarios, en este sentido la CE está preparando un documento único que podrá ser utilizado en todos los países europeos.
- La necesidad de una Ventanilla Única para la gestión administrativa del buque y recepción de documentos de embarque de mercancías, es otro de los aspectos que agravan la agilidad del transporte.

³⁸ SSS en adelante

³⁹ Libro Blanco de la UE. Disponible en: < http://europa.eu.int/comm/energy_transport/es/lb_es.html >

⁴⁰ Descontando el tráfico de trasbordo.

⁴¹ Eurostat/Dirección General para la Energía y el Transporte. < http://epp.eurostat.cec.eu.int/portal/page?_pageid=1090.30070682.1090_30298591&_dad=portal&_schema=PORTAL >

- La carencia de conexiones idóneas de las líneas de SSS con sus *hinterlands* de distribución.
- La necesidad de promocionar el SSS, el tráfico fluvial y el ferrocarril, en un futuro, para aliviar y mejorar los cuellos de botella de la distribución.

En resumen el cabotaje se presenta en la actualidad como una de las mejores soluciones a la congestión del tráfico rodado y más aún teniendo en cuenta las expectativas de concentración del tráfico oceánico en los grandes puertos portal (*HUBS*).

En resumen las nuevas infraestructuras portuarias son factores clave para la determinación de los puertos en la nueva red mundial del transporte, debiendo presentar soluciones claras a la demanda de infraestructuras tanto desde el sector privado como público.

2.4 Evolución de la investigación de operaciones

2.4.1 Generalidades

Los primeros estudios de investigación de Operaciones⁴² se realizaron en Gran Bretaña y EE.UU. a principios de los cuarenta, concretamente en los inicios de la Segunda Guerra Mundial, la mayoría de estos estudios fueron desarrollados por equipos multidisciplinares, abordando problemas de la operativa militar, como la coordinación de los nuevos equipos de radar y los puestos de baterías, integración del radar al sistema de alarmas y detección rápida, determinación del tamaño óptimo de un convoy, determinación del alcance y efectos de una bomba, operaciones de búsqueda de minas, determinación de la ruta óptima a seguir en un campo de minas por un submarino y buques de superficie, etc.

“The Blackett Circus” fue uno de los primeros equipos que realizó estudios relacionados con problemas de la operativa militar, aplicando esta nueva metodología. Este equipo estaba formado por científicos de varias disciplinas, básicamente matemáticos.

A principios de los cuarenta no había métodos matemáticos propios de la investigación operativa, fueron estos equipos quienes desarrollaron los métodos de programación matemática y probabilísticos así como la aplicación de criterios heurísticos para la solución de determinados problemas.

Una vez terminada la Segunda Guerra Mundial, las técnicas de la Investigación Operativa quedaron fuertemente asentadas en el entorno militar, básicamente en las marinas de los EE.UU. y Gran Bretaña.

La segunda revolución industrial con la aparición de los ordenadores y las nuevas tecnologías de la información junto con la creciente competitividad y complejidad de los procesos industriales proporcionaron un terreno abonado para la I.O.

The Massachusetts Institute of Technology (MIT), The Case Institute of Technology y la Jon's Hopkins University fueron las primeras instituciones en desarrollar seminarios, conferencias y cursillos en I.O.

2.4.2 Características de la I.O.

Las características básicas de un proyecto de I.O. son: 1) Orientación al sistema, 2) equipos mixtos, 3) métodos para la solución del problema.

⁴² Gue, R.L. y Thomas, M.E. *Mathematical Methods in Operations Research*. New York: The Macmillan Co., 1968.

- 1) Orientación al sistema significa que cualquier acción sobre un subproceso puede afectar a otro negativamente y entonces decimos que el sistema está suboptimizado o que padece miopía.
- 2) Los equipos están formados por expertos de distintas especialidades.
- 3) Otra característica diferenciada de la I.O. es la aportación de nuevos métodos para la aproximación y solución de problemas. Son problemas de decisión complejos y debemos determinar cual es la alternativa óptima.

Durante el estudio de un problema normalmente se diseña un modelo en función de las diversas alternativas, las variables controlables y las incontrolables, que indicará la eficiencia de cada alternativa.

$$E = f(C, U,)$$

Las variables incontrolables pueden ser deterministas o aleatorias, lo que implicaría la utilización de métodos de programación matemática en el caso determinista ó métodos probabilísticos en el segundo (teoría de juegos, teoría de decisiones, programación dinámica estocástica, cadenas de Markov, colas, etc.)⁴³.

2.4.3 Enfoque de la I.O.

Para poder evaluar diferentes alternativas y diferentes modelos lo más apropiado es disponer de técnicas cuantitativas, como por ejemplo los modelos matemáticos o las simulaciones. No obstante esto no significa que el análisis matemático sea la parte esencial de la I.O.

En realidad un estudio contiene varias etapas⁴⁴:

- *Definición del problema, objetivos y recolección de datos:* En la realidad los problemas se manifiestan inicialmente de una manera vaga e imprecisa, una correcta definición del problema es crucial para que la respuesta del problema sea correcta o lo más aproximada a la realidad.

Los objetivos han de ser adecuados, es decir, han de dar una solución al problema. Además no siempre se trata de optimizar, muchas veces el objetivo trata de conseguir unos resultados satisfactorios al problema que a largo plazo se consideran más adecuados, como por ejemplo estabilizar la producción, aumentar el prestigio, etc.

⁴³ Bronson, R. Investigación de Operaciones. 1ª ed. México D.F.: McGraw-Hill, 1993. ISBN 97-010-0257-1.

⁴⁴ Hillier, F.S.; Lieberman, G.J., 2002. Hall, R.W., 1991. Bronson, R., 1993.

Por último la recolección de datos es una larga y ardua tarea, en muchos casos debe replantearse el diseño de los sistemas de información ya que estos no proporcionan en absoluto la información necesaria y si otra totalmente inútil.

- *Formulación del modelo:* Normalmente el modelo será matemático aunque podríamos utilizar modelos descriptivos, físicos (maquetas, fotos, organigramas, planos, etc.), heurísticos, simulaciones numéricas, etc.

En cualquier caso el modelo será una representación idealizada de la realidad y sirve para dar una visión del problema, mostrar sus interrelaciones y facilitar su análisis.

El modelo matemático más utilizado es la programación lineal, que es un conjunto de ecuaciones e inecuaciones que tienen en cuenta los objetivos, las restricciones, las variables y los parámetros.

Este modelo ha de ser manejable, tener una correlación en sus predicciones con la realidad y conseguir una eficiencia global de todo el sistema.

- *Desarrollo de procedimientos* basados en el modelo que deriven soluciones al problema: Generalmente mediante la aplicación de los algoritmos del modelo a una aplicación informática.

En algunos casos la solución buscada no será la óptima sino que mediante procedimientos heurísticos (basados en la experiencia) se buscará una solución sub-óptima. En este sentido se está progresando en el estudio de procedimientos heurísticos eficientes (meta-heurísticos) que buscan la solución óptima a modelos heurísticos.

En esta etapa se hace un estudio post-óptimo mediante un análisis de sensibilidad del modelo. Se comprueba que los parámetros se ajustan a la situación real y se determina cual es su grado de sensibilidad.

Por último se decide que modelo y que alternativa (en función de los parámetros) es la que tiene una mejor correlación con la realidad.

- *Prueba del modelo:* Mediante un proceso reiterado de ensayos, se van detectando y corrigiendo las fallas, hasta que el modelo produce unos resultados razonablemente válidos, esto es la validación del modelo.

Un método muy utilizado para la validación del modelo es realizar una prueba retrospectiva utilizando datos históricos y reconstruir situaciones del pasado para comprobar la fiabilidad del modelo.

- *Preparación del modelo:* Se trata de documentar la metodología usada en el diseño, la mecánica de los procedimientos que se utilizarán para su puesta en

marcha y funcionamiento y como se manejarán los resultados obtenidos para la toma de decisiones final.

En algunos casos el modelo implanta automáticamente las soluciones al sistema, en otros es necesario un soporte para la toma de decisiones en base a los resultados obtenidos.

- *Puesta en marcha del modelo:* Una de las mayores dificultades de un arranque (con migración) es la seguridad, en el sentido de que el sistema no se desvirtúe debido a posibles fallas no detectadas en el nuevo modelo. Esto requiere que el nuevo sistema pueda trabajar en paralelo con el viejo durante la primera fase de la migración, un periodo de formación del personal implicado y que el sistema disponga de una retroalimentación que permita su mantenimiento corrigiendo desviaciones de los resultados y se actualice de acuerdo a las necesidades cambiantes. Esta etapa es la más crítica junto a la primera en que se define el problema y las bases iniciales.

2.4.4 Conclusiones

La I.O. ha desarrollado una metodología y herramientas propias, basadas en el método científico y en las matemáticas respectivamente.

La formulación del modelo (matemático o no) no es la etapa fundamental, hay que considerar muy cuidadosamente la identificación del problema, la selección de objetivos, variables y parámetros; análisis post-óptimo y correlación con la realidad; validación del modelo y puesta marcha.

2.5 Antecedentes en estudios de productividad en terminales de contenedores portuarias. Estado del Arte

2.5.1 Generalidades

En los últimos 40 años desde la aparición del contenedor como vehículo de transporte se han realizado numerosos estudios y programas de investigación que podemos encontrar en diversas fuentes: *Revistas científicas* como Operations Research, Transportation Research y Transports, entre otras; *ponencias* presentadas en las conferencias anuales del TOC (The Terminal Operations Conference & Exhibition) y Boxship (organizada por el “Lloyd’s List events”); estudios, programas y estadísticas realizados por *organismos* como el CETMO (Centro de Estudios del Transporte del Mediterráneo Occidental), CELSEM (Centro de Logística y Servicios Marítimos), ABIE (Australian Bureau of Industry & Economics), Eurostat (Statistical Office of the European Communities), *Autoridades Portuarias*, y *Universidades* como la de Austin en Texas, Berkeley en California, Kobe en Japón, Hong Kong y Delft en Holanda; revistas especializadas del sector como Containerisation, Boxboard Containers, Container Management, etc., y una bibliografía especializada en operaciones portuarias.

Resumen de las causas⁴⁵:

- Aparición del contenedor como vehículo de transporte a finales de los cincuenta, su normalización y la progresiva expansión de su uso.
- Un crecimiento sostenido de un 10% desde 1980 y una previsión de un 7% desde el 2005 hasta el 2015.
- Necesidad de mejorar la eficiencia y la productividad debido a la falta de espacio para la ampliación o creación de nuevas terminales.
- Un fuerte incremento y desarrollo del transporte multimodal como solución a los cuellos de botella en el transporte.
- Desarrollo de nuevas tecnologías en equipamiento y sistemas de la información, así como la mejora de las infraestructuras del transporte y portuarias.

⁴⁵ Coincidiendo con:

Monfort A. [et al.]. Terminales marítimas de contenedores: El desarrollo de la automatización. 1ª ed. Valencia: IPEC (Fundación Instituto Portuario de Estudios y Cooperación de la Comunidad valenciana), 2001. ISBN 84-923957-3-7.

León, A.; Romero R. Logística del Transporte Marítimo. 1ª ed. Barcelona: LogisBook, 2003. Colección “GESTIONA”. ISBN 84-86684-20-X.

Chadwin, M.L. [et al.]. Ocean Containers Transportation: An Operational Perspective. New York: Taylor & Francis, 1990. ISBN 0-8448-1628-0.

- El incremento de la Globalización ha generado un aumento constante de las cargas y cambios estratégicos constantes en el tráfico marítimo.
- El nuevo escenario requiere la integración de la operativa portuaria en una economía de escala de la producción.

Podemos considerar la taxonomía de los estudios en función de su *objetivo*, del *método* utilizado, y por último en función de su *alcance*. Son tres maneras distintas de clasificar un mismo estudio, por ejemplo consideremos un estudio cuyo objetivo sea incrementar la productividad de las grúas de muelle, que el método sea un modelo de colas y en consecuencia tenga un alcance microscópico. Otro ejemplo sería un estudio cuyo objetivo sea la viabilidad de una Terminal de Contenedores en el puerto “X”, el método utilizado podría ser un simulador y el alcance macroscópico.

2.5.2 Estudios en función de su objetivo

En el ejemplo del apartado anterior, el estudio que busca un mayor rendimiento de las grúas tiene un objetivo operativo y el segundo ejemplo que busca la viabilidad de una Terminal de Contenedores tiene un objetivo económico. No obstante tengamos en cuenta que el objetivo no necesariamente ha de ser mejorar la productividad sino que podría ser aportar un nuevo valor añadido, estabilizar las ventas, mejorar la imagen, buscar nuevos mercados, nuevos productos, etc.

El incremento de la productividad, bien sea del capital, la maquinaria, el trabajo, etc., suele ser el objetivo de la mayoría de los estudios, entendiendo que la productividad, desde el punto de vista operativo o económico, es la relación entre la producción obtenida y los recursos empleados. Por lo tanto teniendo en cuenta que el propósito, la finalidad y el alcance sean de tipo económico u operativo podemos distinguir dos tipos de objetivos:

- Eficiencia Operativa
- Eficiencia Económica

Evidentemente ambos objetivos están relacionados, esto es, el objeto final de una mejor eficiencia operativa es disminuir los costes, aunque en ocasiones un aumento del rendimiento operativo implica otro aumento de los costes y al contrario una disminución de los costes puede también implicar un peor rendimiento.

Eficiencia Operativa

Para conseguir este objetivo se propone definir la técnica o métodos a utilizar en los diferentes procesos productivos y la adecuada asignación de recursos para conseguir la mayor eficiencia. Esto comprende la planificación (medio plazo), programación (corto plazo), ejecución, seguimiento y control de los procesos. En resumen se trata de definir los métodos de trabajo, la distribución de los equipos y del personal y en general toda la ordenación del proceso con objeto de mejorar el *output* operativo.

Eficiencia Económica

La programación económica debe tener en cuenta los aspectos técnicos de la producción pero su objetivo es maximizar el beneficio de la empresa, es decir se trata de un plan que teniendo en cuenta las diversas magnitudes técnicas busca un objetivo económico a corto, medio o largo plazo.

La matriz tecnológica es la expresión cuantitativa de la combinación de recursos mediante las distintas técnicas que pueden ser utilizadas por la empresa para obtener el producto. Esta matriz viene dada por un cuadro de números que expresan las cantidades a utilizar de los distintos factores en los diferentes procesos productivos y sus rendimientos respectivos. Esta matriz nos indica las restricciones, en cuanto a recursos, del proceso productivo y el rendimiento de la función objetivo. Dicho de otra manera son los modelos agregados de planificación de la producción, que redimensionan los recursos en previsión de cambios futuros.

2.5.3 Estudios en función del método

Taxonómicamente los métodos utilizados en los estudios de operativa portuaria se pueden dividir según la clase de métrica utilizada y según el tipo de herramienta. En una primera aproximación deberíamos de considerar que tipo de métricas definen mejor el grado de consecución de los objetivos y al mismo tiempo son más útiles para la toma de decisiones. Después podemos considerar una clasificación en base al método, en sentido estricto, centrándonos en torno al tipo de herramienta utilizada,

En los dos ejemplos del apartado 2.5.1 en el primer caso cuando hablamos de la productividad de grúa estamos utilizando una métrica desagregada, esto es, los movimientos por hora de grúa. En el segundo caso, estamos midiendo la función de utilidad sobre la conveniencia de construir una nueva terminal de contenedores, es decir consideramos la utilidad como una medida agregada que nos indica el grado de conveniencia de poner en marcha una terminal de contenedores en una región determinada. En consecuencia, según el criterio de esta primera aproximación podemos considerar que los trabajos existentes sobre productividad portuaria y en un sentido más amplio en redes e instalaciones de transporte se centran en dos tipos de estudios:

- Modelos en base a métricas agregadas o globales de productividad, que intentan cuantificar la eficiencia del sistema en conjunto.
- Modelos desagregados que analizan la eficiencia de los diferentes procesos independientemente.

En una segunda aproximación consideramos los estudios en función de la herramienta utilizada. Esto es, índices, mediante aproximaciones estadísticas en base a datos empíricos; modelos analíticos, mediante relaciones de tipo funcional; y por último simulaciones de eventos discretos o continuos.

Índices y aproximaciones estadísticas de productividad portuaria

Estas medidas no distinguen las causas, es decir son indicadores o aproximaciones estadísticas en base a datos empíricos, que relacionan *inputs* con *outputs*, normalmente sin ponderar. Un ejemplo de este tipo de indicadores es considerar la relación entre la ocupación de explanada (en TEUS) y el rendimiento de grúa (en Movimientos), lógicamente tendremos una curva que nos indicará que a más ocupación menos rendimiento.

Básicamente se trata de diferentes estudios en base a una toma de datos empíricos y a la utilización de una diversa tipología de índices, es decir, simples, complejos, sin ponderar o ponderados. En resumen son medidas agregadas de productividad total, en cuanto a que son datos empíricos que pueden englobar varios procesos, o medidas desagregadas que miden la eficiencia de determinados procesos en las operaciones portuarias, con el objetivo de conseguir una asignación más eficiente de los recursos.

Relación de los indicadores más comunes que se utilizan en la operativa portuaria⁴⁶:

- Tiempo de espera/tiempo de servicio > 10% es inaceptable (buques)
- Índice de ocupación de atraques: entre un 35% y un 70%. Para mayores índices de ocupación los tiempos de espera son importantes (metros por horas ocupadas/metros por horas disponibles)
- Rendimiento grúa y rendimiento buque
- Rendimiento de máquina (para la transferencia de puerta)
- Tiempo de servicio por camión < 30 minutos
- Disponibilidad de equipo (*Availability*) > 90%
- Capacidad de explanada, máximo a un 75%
- Rotación del inventario de contenedores
- Rotación de los metros lineales de muelle
- Índices de calidad: robo, confiabilidad, etc.
- Índice de utilización de equipo
- Índice de utilización de manos > 80%
- Índices financieros: ingreso por TEU, etc.
- Tiempo total de averías
- Número de Movimientos Medio Entre Averías. MMBF (*Mean Move Between Failure*)
- Tiempo Medio de Reparación MTTR (*Mean Time To Repair*)
- Objetivo MMBF > 1500 movs.
- Demanda de Mantenimiento MD (*Maintenance Demand*). Indica cuantas horas de mantenimiento y reparación son necesarias para producir 1000 movimientos

Existe la necesidad de normalizar y homogenizar los indicadores de productividad y calidad en el entorno de las terminales de contenedores. Para ello debemos tener en cuenta ciertos conceptos clave en relación a estas métricas:

⁴⁶ Coincidiendo con los ponentes de este seminario: Visser, W. [et al.]. Managing Terminal Capacity and Productivity. Seminar Documentation. Lloyd's Maritime Academy, 29-30 september 2004. Londres: informa maritime & transport. Registered number: 1072954. Disponible en: <
www.lloydsmaritimeacademy.com/>.

- Contenedor versus TEU en función del objetivo: Capacidad, Rendimientos, Facturación, etc.
- Rendimiento bruto versus rendimiento neto: La diferencia nos indica las posibilidades de mejora dentro del marco de una determinada economía de escala.
- Escala tiempo en función del grado de detalle requerido: horas, intensivas⁴⁷, semanal, mensual, etc.
- Selección del tipo de *benchmarking*⁴⁸: Interno (evolución de los objetivos en el tiempo, impacto de medidas específicas que se han tomado, transformaciones tecnológicas, etc.), externo (comparativa del grado de eficiencia con otras terminales).

La normalización de las métricas es un tema que ha generado y genera mucho debate en los foros internacionales, por ejemplo para algunas terminales el rendimiento operativo de grúa incluye el tiempo de paso de un buque a otro, el tiempo de avería de maquinaria, etc., para otras terminales, en cambio, estas demoras deberían de asociarse solo al rendimiento bruto. Otro tanto sucede con la contabilización de las tapas como movimientos, en algunos casos se cuentan como 1 movimiento en otros se cuentan como 1,5 movimientos, ¿cómo debemos de contabilizar los movimientos con *Twin* o *Tandem*?⁴⁹ Por el número de movimientos, por el número de contenedores, por el número de TEUS, y así un largo etcétera que conviene normalizar a efectos de poder hacer comparaciones reales entre diferentes terminales marítimas de contenedores.

En resumen, ¿cuántos tipos de rendimiento debemos de tener en cuenta? Bruto, neto, operativo, etc. En cuanto a las demoras, ¿cuántas y a que tipo de rendimiento debemos de asociarlas? Esto es un ejemplo simple en cuanto al rendimiento de grúa, la cosa se complica si hablamos de índices complejos ponderados que midan la eficiencia de la terminal en su conjunto.

Para terminar con los índices decir que encontramos indicadores para las diferentes funciones operativas y también indicadores agregados o globales (con reservas), en función de los costes o la eficiencia productiva, pero en ningún caso una métrica global normalizada que defina la eficiencia operativa de una terminal de contenedores en conjunto. Puede haber terminales con un rendimiento de grúa excelente y en cambio un rendimiento no aceptable de la transferencia con puerta, o tener unos rendimientos operativos excelentes a cambio de unos costes demasiado altos, etc.

Modelos analíticos de productividad en puertos

En la utilización de este tipo de herramienta en estudios de operativa en terminales de contenedores, estamos hablando básicamente de dos tipos: En primer lugar modelos de

⁴⁷ Periodos de tiempo en que se divide la operativa de un buque. Normalmente de seis horas por periodo y cuatro intensivas por día.

⁴⁸ Mediante el *Benchmarking* se puede medir el grado de consecución de los objetivos en relación a los mejores resultados obtenidos en el sector.

⁴⁹ *Spreaders* preparados para manipular varios contenedores en una izada

Programación Lineal (PL), que intenta optimizar la asignación de espacios en explanada en función de las distancias, los buques, y las fechas; en segundo lugar el análisis de colas, utilizado en la optimización de los ciclos de máquina, operativa de transferencia de puerta, e incluso en la asignación de áreas de aparcamiento.

Son modelos matemáticos determinísticos o procesos estocásticos que sirven para visualizar el comportamiento del modelo de forma estática o dinámica respectivamente.

A diferencia de los índices o indicadores, son relaciones funcionales mediante variables, parámetros y constantes, que necesitan conocer las causas y ponderarlas, es decir, necesitamos dar un peso específico a cada variable y mediante los parámetros dar un grado de sensibilidad a cada ecuación en función de los recursos del sistema. En definitiva son modelos de una o varias ecuaciones, multivariantes, cuyo grado de sensibilidad se acaba de ajustar mediante parámetros.

La utilidad de un modelo analítico es que no es muy costoso, relativamente rápido de conseguir y de utilizar, dándonos una aproximación aceptable de cómo se comportará la realidad.

Simuladores

En el apartado 1.4.3 se han definido las características básicas de un simulador, aquí en referencia a los trabajos realizados y en definitiva al uso que hasta el momento se está haciendo de este tipo de herramienta en el entorno de la operativa portuaria, dividiremos los simuladores en dos tipos:

- Genéricos, como *Witness* y *Arena*, etc., que requieren un ajuste previo en función de las necesidades, pueden simular procesos muy complejos de flujos. Son paquetes estándar que el usuario parametriza en función de sus necesidades, se han utilizado para analizar operativas de aeropuertos, diseño de terminales de contenedores, etc., en cualquier caso requieren un ajuste complejo en base a bibliotecas de funciones.
- Específicos, son hechos a medida para un sistema en concreto, aunque son parametrizables por el usuario y más sencillos de utilizar que los genéricos. En este sentido consultorías especializadas en sistemas operativos de terminales de contenedores (TBA Netherlands, JWD Group, Gottwald Port Technology, etc.) han aplicado estos simuladores a terminales como ECT en Róterdam, CTA en Hamburgo y Tilbury en Reino Unido entre otras.

Es claro que el simulador busca una solución global al sistema, teniendo en cuenta todos los subprocesos, equilibrando los flujos en tiempo real y buscando la solución óptima de forma dinámica. En contrapartida es la herramienta más costosa y laboriosa de obtener. De alguna manera podemos decir que el simulador es como el piloto automático de la eficiencia en la producción.

2.5.4 Estudios en función de su alcance

Volviendo a los ejemplos del apartado 2.5.1 observamos que en el estudio del rendimiento de grúa se ignoran otros procesos operativos y se analiza aisladamente como mejorar el rendimiento o productividad de la grúa, es decir estamos hablando de un alcance microscópico. En el segundo caso se estudia la viabilidad de una Terminal de Contenedores en una determinada región y su zona de influencia, aquí en cambio el alcance es macroscópico.

En economía, o concretamente en teoría económica se utilizan los términos de microeconomía y macroeconomía para referirnos a las disciplinas que estudian el mercado y su funcionamiento interno en el primer caso y las interrelaciones entre un conjunto de mercados en el segundo caso. Evidentemente todo esto dicho de una manera muy sintetizada.

En este trabajo como en muchos otros que pretenden profundizar sobre la operativa de contenedores utilizaremos los términos microscópico y macroscópico para diferenciar según que el alcance sea interno en cuanto que afecta a uno o más procesos de una misma terminal o que este sea externo, es decir, que afecte al sistema económico de la región.

Como se ha dicho en la introducción, el alcance puede ser microscópico o macroscópico. La primera fase de un proyecto lógicamente tiene un alcance macroscópico en cuanto que se analiza la necesidad de instalar una terminal en una región o zona y su viabilidad. Este análisis lo suelen hacer las autoridades locales, regionales y estatales. Una vez decidido que existe la necesidad crear una terminal portuaria de contenedores, se hace un estudio de viabilidad y recursos necesarios desde un punto de vista microscópico.

2.5.5 Resumen

Muchos autores han desarrollado trabajos cuyo objetivo era el rendimiento de la producción bien en toneladas hora o bien en contenedores hora, etc.; tiempos de espera y colas de los camiones en puerta; esperas y colas de buques para disponer de atraque y grúas; ciclos de máquina (explanada y grúa), estrategias de grúa para trabajar con el máximo de manos por buque, etc.

Algunos de estos estudios tienen un objetivo técnico de maximizar la producción, otros como la planificación agregada de recursos, intentan optimizar la intensidad de trabajo versus capital (tecnología), y tienen un objetivo económico. En cuanto al método, teniendo en cuenta que normalmente las hipótesis se fundamentan en criterios heurísticos, podemos decir que todos los modelos son matemáticos bien de tipo no paramétrico, analíticos o utilizando simuladores. En cuanto a su alcance todos tienen un objetivo microscópico unos a nivel técnico de la producción y otros a nivel de costes, en cualquier caso el alcance macroscópico queda fuera del objetivo de esta tesis como ya

he dicho en la introducción. En general, el propósito de todos ellos es actuar sobre criterios de eficiencia económica y productividad de las operaciones.

Podemos considerar que las terminales de contenedores no han llegado todavía a la madurez, llevamos 40 años con este tipo de operativa marítima, es por ello que está en constante evolución siendo la producción de estudios y conferencias creciente. A modo de ejemplo veamos algunos de los realizados a lo largo de estos años:

Pérez Fiaño⁵⁰ (1997), desarrolla un modelo de productividad combinada de todas las grúas, teniendo en cuenta la eslora del buque, esperanza de movimientos totales por buque y distribución de los mismos. Además mediante diversos algoritmos optimiza y homogeniza la asignación de mano de obra, en definitiva busca la máxima productividad de grúa teniendo en cuenta los costes. La tesis de Pérez Fiaño (1997, I.3.1-I.3.4), realiza un estudio de antecedentes, de los que citaremos algunos por su interés histórico. Este autor divide los estudios en modelos de asignación de recursos, medidas no paramétricas, modelos paramétricos y por último modelos analíticos:

- Modelos de asignación de recursos: Bowman (1956), Hanssman y Hess (1960), Hu y Prager (1959), utilizaron periodos discretos de tiempo para modelar la utilización de factores mediante flujos de redes y la estructura de costes por el método del transporte. Holt(1960), trabaja con una estructura de costes cuadrática, para conseguir que las reglas de decisión sean lineales. Harling (1990), automatización versus intensidad de mano de obra. Productividad y “*prácticas restrictivas*” al tiempo que define estrategias para su progresiva eliminación. Hall (1996), su objetivo es la toma de decisiones que optimice los costes de la combinación de empleados fijos y eventuales, horas extras y horas establecidas, contrataciones y despedidos.
- Medidas no paramétricas: Le Goaziou (1983), propone diferentes indicadores para cada función portuaria, considera que no es posible homogenizar las distintas variables que intervienen, critica aproximaciones como el cálculo del valor añadido y las medidas agregadas de la producción en general. Suykens (1984), toneladas hora netas, por hombre, por mano, y por hora buque en muelle. Estos índices reflejan los costes del armador. Baudez (1985) quien considera dos tipos de productividad, la de los buques y la de las mercancías⁵¹. Diewert (1989) medidas de los cambios generados por transformaciones tecnológicas. Mediante aproximaciones estadísticas e indicadores numéricos.
- Modelos paramétricos: Bendell y Stuart (1987), definen el concepto de productividad como medida en TEUS o toneladas por unidad de tiempo, capital y trabajo. Considerando características del buque, distribución de los movimientos, etc., en definitiva un análisis multivariante con coeficientes. Barger (1951), Hooper (1987), Gorden (1991), consideran que la

⁵⁰ Pérez Fiaño, J. E. Optimización del Proceso de Asignación del Trabajo Portuario. Tesis Doctoral, UPC, Ingeniería Civil, 1997. [Biblioteca Rector Gabriel Ferraté de la Universitat].

⁵¹ Es decir desde la eficiencia del Armador y del cargador respectivamente.

productividad es una comparación *input/output* aunque en este caso ponderan los *inputs* en función de su relevancia. Tongzon (1995), considera que existen pocos estudios que identifiquen los factores determinantes de la eficiencia portuaria y que en general fallan en cuantificar su contribución relativa, concluye que el factor determinante de la productividad es la grúa.

- Modelos analíticos: Kiesling (1991), trabaja con modelos de colas, realizando estudios con la distribución exponencial y alternativamente prueba la distribución de Erlang más flexible para el ciclo explicado-grúas, mientras que la de Poisson representa bien los procesos de llegadas, aplicable a las entradas de camiones.

Daganzo⁵² (1989), ha desarrollado modelos estocásticos capaces de predecir el tráfico de buques, lo que permite optimizar la utilización de los muelles de una terminal. Asume que la productividad de las grúas y la disminución de demoras portuarias son factores clave. El objetivo es definir un modelo matemático que calcule el flujo de buques en periodos punta. Analiza diferentes tipos de buque y estrategias operativas de grúas. Concluye que la disponibilidad de Línea de atraque y grúas son los factores determinantes en el tiempo de rotación. Aunque admite otros factores como la congestión terrestre, la disponibilidad de práctico y remolcadores, así como la cantidad de movimientos por bahías⁵³ (del buque) relacionada con la estrategia de grúas.

Taleb-Ibrahimi⁵⁴ (1989), ha desarrollado modelos de productividad de grúa y aparcamiento de contenedores en explanada con pocos datos y un mínimo de variables de decisión que permiten calcular la media y el máximo de acumulación de contenedores y en consecuencia los *slots* que deben reservarse en función de futuras llegadas. También profundizó en el uso de estrategias dinámicas de asignación de espacios en función de las frecuencias de llegadas de las diferentes líneas. Su objetivo es analizar las relaciones causa-efecto entre los *schedules*⁵⁵ de los buques y la gestión de espacios disponibles. También analiza la carga de trabajo para dos estrategias de los contenedores de exportación, la primera estiba los contenedores en su posición definitiva sin posteriores movimientos hasta la operación de carga en buque, en la segunda utiliza un buffer donde se almacenan todos los contenedores de exportación hasta unas horas antes de la operativa de buque que es cuando se prepara la carga en zonas próximas al muelle de atraque. Concluye que la segunda opción permite operar el buque con un mínimo de remociones de los contenedores de carga y un mejor aprovechamiento de los espacios en el buffer de entrada.

⁵²Daganzo, C. The Crane Scheduling Problem. Transportation Research, 1989, vol. 23B, n°3, p.159-175.

⁵³ Una bodega se compone (virtualmente) de tres partes, la proa, la popa y la suma de ambas. Cada una de estas tres partes tiene asignado un número. Por ejemplo la bodega # 1 tendría la bahía 1(proa) para containers de 20', la 3 (popa) 20' y la 2 (toda la bodega) para contenedores de 40'.

⁵⁴ Taleb Ibrahimi, M. Modelling and analysis of container storage in ports. Ph.D. Thesis, University of California at Berkeley, Dept. Of Industrial Engineering and Operation research, 1989.

⁵⁵ Tabla de horarios de llegada y salida del buque en los puertos de una rotación (viaje redondo).

Chadwin, Pope y Talley ⁵⁶ (1990), inician dirigen y coordinan un programa de la Universidad de Norfolk, para especialistas y científicos del transporte marítimo comercial. El objetivo de este programa es mejorar la eficiencia de los diferentes procesos que intervienen en el tráfico marítimo de contenedores: Movimientos horizontales (explanada) y de carga/descarga en una terminal, influencia de las nuevas tecnologías en el análisis operacional y orgánico de las nuevas terminales, estudio del impacto económico de las nuevas actividades portuarias en términos de nuevas relaciones laborales, empleo, beneficios, tarifas e impuestos, diseño de modelos de costes asociados a la operativa de una terminal y a los costes operativos de un buque portacontenedor, modelos y procedimientos para optimización de rutas como centros de carga *multiporting* y servicios *feeder*, impacto de las infraestructuras terrestres como retro-áreas o terminales secas (interiores) de contenedores, ferrocarril, carreteras y aguas interiores.

Peterkofsky y Daganzo,⁵⁷(1990) Según estos autores un buque de carga tipo pasa el 60% de su vida útil en puerto, siendo el coste diario por hora en muelle de 1000\$, existe la necesidad de minimizar este tiempo, en base a aumentar el rendimiento en muelle y la disminución de las demoras operativas. Para construir el modelo consideran un buque tipo portacontenedor, teniendo cada bodega una parte del trabajo a realizar, y tomando el rendimiento de las grúas como constante, programan la operativa del buque como un taller con “n” máquinas idénticas en paralelo (las grúas) que trabajan en varias bodegas, con trabajos independientes, de una sola etapa y preestablecidos. En la práctica esto implica pocos buques y muchas bodegas, en consecuencia la programación es muy compleja para mantener la eficiencia global de la operativa. Se busca que las grúas mantengan la eficiencia global y minimizar el coste por demoras mediante una ponderación de las mismas y una preasignación de las tareas de cada grúa.

Castilho y Daganzo⁵⁸ (1993), en las operaciones de descarga de buque se apilan los contenedores en explanada hasta una altura determinada siendo el esfuerzo requerido para recogerlos función de la secuencia de entrega, la cual es aleatoria. Este trabajo mide el esfuerzo requerido para la entrega del contenedor teniendo en cuenta dos estrategias básicas, en la primera se estiban los contenedores en los huecos más próximos al buque manteniendo el índice de altura lo más uniforme posible, en el segundo caso se estiban cronológicamente según tiempo de llegada. Se trata de comparar ambas estrategias para diferentes sistemas, es decir depende de las características de cada terminal el utilizar una u otra operativa. Por último comprueban que para estancias de contenedores con poca dispersión funciona mejor la segregación cronológica de estibas.

⁵⁶ Chadwin, M.L. [et al.]. *Ocean Containers Transportation: An Operational Perspective*. New York: Taylor & Francis, 1990. ISBN 0-8448-1628-0.

⁵⁷ Peterkofsky, R.I., Daganzo, C. A branch and bound solution method for the crane scheduling problem. *Transportation Research Part B: Methodological, Volume 24, Issue 3, June 1990, Pages 159-172*

⁵⁸ Castilho, B., Daganzo, C.F. Handling strategies for import containers at marine terminals. *Transportation Research*, 1993, 27 (2), 151–166.

Taleb-Ibrahimi, Daganzo, De Castilho⁵⁹ (1993), realizan un estudio sobre apilamiento en operaciones de exportación, cuantificando el desempeño en función del espacio disponible y la cantidad de movimientos previstos. Concluyen que identificar la mejor estrategia es complicado ya que su optimización es combinatoria por naturaleza, dependiendo del orden de llegada de los buques y de los contenedores. Este estudio, a largo plazo, calcula el espacio mínimo necesario, el tipo de manipulación y *layout* en función del tráfico de la terminal. A nivel operativo (corto plazo) minimiza el esfuerzo operativo (remociones) para unas condiciones dadas de tráfico y espacio disponible.

Roux⁶⁰ (1996) mediante un conjunto de expresiones analíticas, estima la capacidad mínima necesaria para almacenar el tráfico de contenedores de importación, considerando como limitación la frecuencia de los momentos de congestión. Hay que tener en cuenta que el tráfico es estacional, al igual que la producción en la industria, esto provoca picos de saturación cíclicos en la ocupación de una terminal de contenedores.

Holguin Veras⁶¹ (1996), analiza la asignación de espacio y tarifación óptimos para conjuntos de contenedores con diferentes prioridades. Se tiene en cuenta el valor intrínseco y logístico de la mercancía con restricciones de capacidad disponible y requerimiento de espacio. Precios y espacios son asignados, por el modelo.

Kim y Bae⁶² (1998) analizan el mismo problema de como reordenar los contenedores de exportación, para la carga en buque, mediante una aproximación jerárquica dividen el problema en tres niveles de prioridades y buscan la solución óptima en cada nivel. Consideran que la reordenación de contenedores es (es verdad) un hecho en las terminales portuarias de contenedores, su objetivo es conseguir colocar los contenedores en el orden exacto en que van a ser cargados en las bahías del buque, se trata de conseguir un espejismo de las bahías del buque en explanada. El primer nivel en que se descompone el problema es conseguir el efecto espejismo, el segundo la planificación de los movimientos, y el tercero su secuenciación.

Imai et al⁶³. (2001), este estudio propone resolver el problema de la asignación de atraques en un sistema de atraque público mediante una asignación dinámica y modulada mediante elementos discretos de espacio DBAP (*Discrete Berth Allocation Problem*). La gestión pública de atraques no es recomendable en la mayoría de puertos

⁵⁹Taleb-Ibrahimi, M., de Castilho, B., Daganzo, C. Storage space vs handling work in container terminals, *Transportation Research Part B: Methodological*, Volume 27, Issue 1, February 1993, Pages 13-32.

⁶⁰ Roux, E.D., 1996. Storage capacity for import containers at seaports. Ph.D. Thesis, University of California, Berkeley. *Transportation Research B* 27 (1), 13–32.

⁶¹ Holguin-Veras, J. Priority systems for marine inter-modal containers. Ph.D. Thesis, The University of Texas, Austin. 1996.

⁶² Kim, K.H., Bae, J.W. Re-marshaling export containers in port container terminals. *Computers and Industrial Engineering*, 1998, 35 (3–4), 655–658.

⁶³ Imai, A., Nishimura, E., Papadimitriou, S. The dynamic berth allocation problem for a container port. *Transportation Research*, 2001, Part B 35 (4), 401–417.

con terminales de contenedores, pero consideran que en Japón mejoraría la eficiencia de costes. Desarrollan un modelo heurístico basado en la optimización de un sistema de ecuaciones que emulan el problema original, el cual requiere poco cálculo de computadora y es fácilmente adaptable a aplicaciones reales.

Zhang et al.⁶⁴ (2002), consideran que una gestión operativa eficiente en una terminal de contenedores es determinante para reducir costes de transporte y un mejor ajuste de los *schedules* de los buques. Analizan el espacio necesario de almacenamiento y la ubicación de los contenedores teniendo en cuenta los recursos (espacio, grúas, y maquinaria de explanada), las escalas de los buques y las distancias, optimizando las cargas de trabajo de todo el sistema, mediante aproximaciones de horizontes rodantes temporales. Es decir programan por periodos de tiempo discretos fijos, y sobre ellos van rodando los días. Por ejemplo, cada seis horas se planifica un día con todos los datos actualizados. El modelo se basa en la optimización de un modelo de PL (Programación Lineal) que tiene en cuenta los *schedules* de los buques, flujos de contenedores, distancias y maquinaria disponible.

Kim y Bae Kim⁶⁵ (2002) este trabajo propone un método para determinar el espacio necesario para el aparcamiento de contenedores y el número óptimo de máquinas de transferencia (puerta-explanada-ferrocarril) para la manipulación de los containers de importación. Es un modelo de costes que considera el coste de espacio, el coste de la inversión en máquinas de transferencia y el coste operativo de las mismas. Tratan dos casos, en el primero minimizan los costes del operador portuario (Terminal) mediante un modelo de costes determinístico, en el segundo se minimizan los costes del operador y del cargador (cliente) mediante un modelo estocástico.

Zhang, C. [et al.] (2002), analiza la secuenciación óptima de los Transtainers en las explanadas⁶⁶ de las Terminales de Contenedores. El trabajo se centra en la operativa de Transtainers o RTGs (*Rubber tyred gantry cranes*) como equipo más utilizado en la manipulación de explanada. Considera que la eficiencia general depende de su productividad y trata de optimizar la carga de trabajo de estas máquinas de forma dinámica en el tiempo. Utiliza la programación lineal entera mixta.

Imai et al.⁶⁷ (2005), en este artículo centran el problema de asignación de atraque en una terminal de contenedores. Plantean dos modelos tipo para la asignación de atraque: La primera mediante una asignación discreta de espacio modulado DBAP y la segunda

⁶⁴ Zhang, C. [et al.]. Storage space allocation in container terminals. *Transportation Research*, 2003, Part B vol.37, p. 883-903.

⁶⁵ Kim, K.H., Bae Kim,H. The optimal sizing of the storage space and handling facilities for import containers. *Transportation Research Part B: Methodological*, Volume 36, Issue 9, November 2002, Pages 821-835.

⁶⁶ Zhang, C. [et al.]. Dynamic crane deployment in container storage yards. *Transportation Research*, July 2002, Part B vol.36, p. 537-555.

⁶⁷ Akio Imai, Xin Sun, Etsuko Nishimura and Stratos Papadimitriou. Berth allocation in a container port: using a continuous location space approach. *Transportation Research*, 2005, Part B, Volume 39, Issue 3, Pages 197-295.

mediante una asignación de espacio continuo CBAP (*Connuous Berth Allocation Problem*). Si bien la asignación de espacios discretos es más fácil de programar, es en cambio menos eficiente en cuanto al aprovechamiento del espacio. En este estudio se centran en un modelo continuo de atraque el cual tiene las ventajas de ser más flexible para los buques que normalmente trabajan en una Terminal de contenedores con esloras muy variables y *schedules* oscilantes. También en este trabajo se basan en un modelo heurístico y su optimización mediante un modelo de PL (Programación Lineal).

Goodchild A. V., Daganzo C.F., (2007)⁶⁸, en este trabajo se analiza el incremento en la productividad de grúa, buque y atraques como consecuencia del aprovechamiento del doble ciclo de las máquinas al utilizar la parte del ciclo en vacío. El doble ciclo es la técnica que aprovecha los movimientos en vacío de grúa y maquinaria de explanada convirtiéndolos en productivos. Concluye el estudio que la utilización de esta técnica puede mejorar el rendimiento operativo en un 10%, mejorando la productividad de buque, grúa y atraque. También se identifican, aunque en menor cuantía, beneficios en la operativa de tierra⁶⁹.

Kap Hwan Kim, Ki Young Kim (2007)⁷⁰, este trabajo analiza el método que determina el precio óptimo de almacenamiento en explanada de los containers de importación. Se caracteriza por periodo de almacenamiento libre y por el precio unitario de los containers que sobrepasan dicho periodo. El modelo muestra los beneficios de su aplicación tanto para la terminal como para el usuario. La distribución de probabilidad de los tiempos de estancia es una función continua de probabilidad.

⁶⁸ Goodchild A. V., Daganzo C.F. Crane double cycling in container ports: Planning methods and evaluation. *Transportation Research*, October 2007, Part B, Volume 41, Issue 8, Pages 875-891.

⁶⁹ El autor de esta tesis diseñó un procedimiento para utilizar el Doble Ciclo en la Terminal de Contenedores de Paranagua en 2002, su puesta en marcha fue satisfactoria con rendimientos superiores en un 38% a los estándares en horas punta, no obstante no siempre es posible y requiere de una estiba específica abordo. Esta técnica es conocida en Brasil como “o espetáculo” por su alta productividad.

⁷⁰ Kap Hwan Kim & Ki Young Kim, Optimal price schedules for storage of inbound containers. *Transportation Research*, October 2007, Part B, Volume 41, Issue 8, Pages 892-905.

3 EL SISTEMA OPERATIVO DE UNA TERMINAL DE CONTENEDORES. INTRODUCCION.

3.1 Resumen

Este capítulo es una introducción a los diferentes procesos operativos que intervienen en una terminal marítima de contenedores mediante su descripción, análisis, tendencias actuales y propuestas para futuros estudios en estos procesos. El propósito de este capítulo es meramente descriptivo con objeto de hacer más comprensibles los capítulos siguientes.

El sistema operativo¹ de una terminal lo podemos subdividir en las siguientes dos grandes áreas:

- Operativa buque: Carga y descarga de buques.
- Operativa de transferencia o de explanada:
 - Carga y descarga de camiones
 - Carga y descarga de ferrocarril,
 - Servicios, movimientos internos² de posicionamiento para inspecciones de aduana, almacén, sanidad y peritajes.
 - *Housekeeping*³, movimientos internos no facturables para la ordenación de la explanada.

En ambos casos el pulmón o motor de la operativa es la explanada de ahí la importancia de su organización, de ella dependen los rendimientos en las operativas de buque y transferencia.

Una vez definidas las dos operativas principales analizaremos los procesos clave que intervienen en cada una de ellas separada o conjuntamente. En los capítulos siguientes analizaremos en detalle el rendimiento de explanada y sus umbrales de producción, que son el objetivo de esta tesis, para terminar con el capítulo de conclusiones finales.

3.2 Estudio de las distancias a bloque y Ciclo del Sistema.

En este apartado analizaremos las distancias óptimas a bloque y el balance de los ciclos de máquina⁴ de explanada y grúas. Dicho de otro modo se trata de calcular las distancias óptimas y número de máquinas óptimo en una operativa explanada ↔ buque. Las

¹ La operativa.

² A petición de los clientes y facturables.

³ Preparación de la explanada para cargas, descargas, clasificación de vacíos, preparación de transbordos, ferrocarril y limpieza y reagrupamiento de bloques y calles.

⁴ El ciclo de máquina es el tiempo que tarda en realizar una operación, es decir es el Periodo.

distancias en la operativa explanada \leftrightarrow camión son, en principio⁵ un problema más simple al tratarse de que la distancia entre bloques de importación/exportación y *buffers* sea la menor posible sin necesidad de equilibrar varios ciclos de máquina.

La operativa de buque se divide en buques a operar y estos a su vez en manos por buque, si consideramos que cada servicio tiene un buque tipo con un rendimiento determinado (promedio histórico) y homogenizando los distintos tipos de movimientos (export, import, vacíos y transbordos) y las distancias a bloque, entonces la distancia óptima será la misma para todas las manos de un mismo buque y el rendimiento operativo vendrá determinado por el número de máquinas que asignemos a cada mano limitado por el rendimiento de grúa del buque tipo.

3.2.1 Nomenclatura

Poza	= lugar donde máquinas y grúa portainer intercambian contenedores
V_a	= velocidad de acercamiento desde la grúa hasta el bloque
V_p	= velocidad de posicionamiento dentro de bloque
V	= velocidad media de máquina (vancarrier).
n	= número de maquinas por mano
F_G	= frecuencia de grúa del buque tipo
R_v	= frecuencia de máquina
d_t	= distancia total a centro de bloque
d_a	= distancia de acercamiento
d_p	= distancia de posicionamiento
t_m	= tiempo de maniobra
T_t	= tiempo total

3.2.2 Cálculo del tiempo de ciclo productivo

Consideramos la distancia de centro de grúa a centro de bloque dividida en dos partes, una siguiendo una trayectoria d_a fuera de bloques en que la máquina trabaja a su velocidad de crucero V_a y otra dentro de bloque y sus inmediaciones d_p en que la máquina va a su velocidad de maniobra (moderada) aproximadamente $1/6$ de V_a , entonces,

$$d_t = d_a + d_p \quad \text{Ecuación 3-1}$$

siendo el recorrido total (ida y vuelta),

$$d = 2d_t.$$

El tiempo total de operación es,

⁵ En realidad es un modelo de colas, como veremos a continuación.

$$T_i = 2 \left(\frac{d_a}{V_a} + \frac{d_p}{V_p} + t_m \right) \quad \text{Ecuación 3-2}$$

donde t_m (un valor paramétrico, que depende de la destreza del manipulante) es el tiempo que tarda la máquina en recibir o depositar el contenedor bien sea en bloque o poza, dicho de otro modo es el tiempo que tarda en cargar o descargar el contenedor de la máquina.

Si tenemos en cuenta que la velocidad de posicionamiento es aproximadamente 1/6 de la velocidad de acercamiento y sustituimos,

$$T_i = 2 \left(\frac{d_a}{V_a} + \frac{d_p}{\frac{V_a}{6}} + t_m \right) = 2 \left(\frac{d_a}{V_a} + \frac{6 \cdot d_p}{V_a} + t_m \right) = 2 \left(\frac{d_i + 5 \cdot d_p}{V_a} + t_m \right). \quad \text{Ecuación 3-3}$$

Este es el tiempo utilizado para realizar un ciclo completo, es decir en ir y volver.

3.2.3 Análisis de la distancia óptima y ciclo de máquina. Determinación del número de máquinas

Asumiendo una distancia de posicionamiento d_p , dentro de bloque, constante para cualquier recorrido e igual a la distancia entre el centro de gravedad del bloque y cualquiera de sus lados de acceso, tendremos que la distancia óptima será la que iguale el rendimiento de grúa con el del número de máquinas asignado.

El tiempo medio por ciclo de máquina será

$$T = \frac{d}{V},$$

siendo V la velocidad media durante el ciclo, la frecuencia de la máquina será,

$$F_V = \frac{1}{T} = \frac{V}{d}. \quad \text{Ecuación 3-4}$$

Entonces la frecuencia de trabajo de grúa para el rendimiento óptimo será,

$$F_G = n \cdot F_V \quad \text{Ecuación 3-5}$$

siendo n el número de máquinas asignadas a la mano. Sustituyendo y utilizando la velocidad media de máquina por ser un parámetro mucho más controlable y estable que su rendimiento obtenemos la distancia óptima.

Sustituyendo 3-4 en 3-5

$$F_G = n \frac{V}{d}$$

de donde

$$d = n \frac{V}{F_G}. \quad \text{Ecuación 3-6}$$

Pero la distancia óptima debe tener en cuenta que el recorrido se produce en tres fases, d_a , d_p , y t_m entonces habrá que homogenizar teniendo en cuenta que durante el tiempo de maniobra la máquina está parada (solamente está arriando o virando spreader), además durante el periodo de acercamiento bien sea a bloque o poza su velocidad es 1/6 de la de trabajo.

Corrigiendo la ecuación (3.3) por tiempo de maniobra y distancia de posicionamiento, es decir multiplicando ambos miembros por V e igualando con (3.6) tendremos,

$$d = 2 \left(\frac{d_t + 5d_p}{V_a} + t_m \right) \cdot F_G \cdot \frac{d}{n}$$

despejando,

$$d_t = \left(\frac{n}{2 \cdot F_G} - t_m \right) \cdot V_a - 5d_p$$

Siendo ésta la distancia óptima corregida por tiempo y recorrido de maniobra.

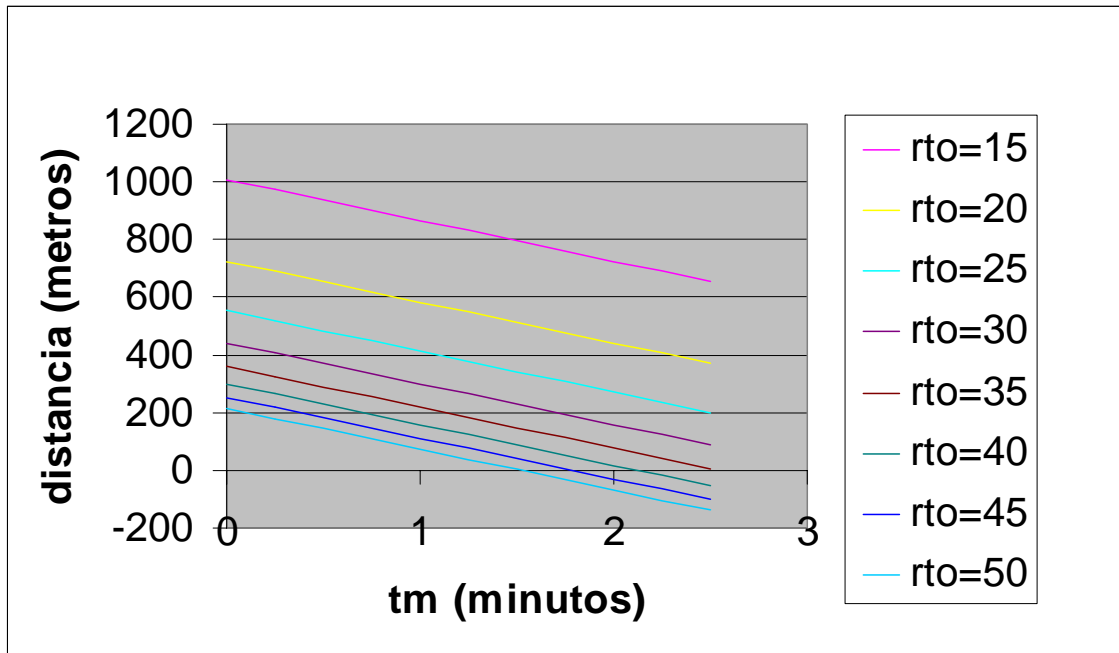


Gráfico 1 Distancia en función del tiempo de maniobra para diferentes rendimientos⁶ de grúa.

En el gráfico anterior observamos como el t_m afecta linealmente a la distancia óptima independientemente del rendimiento grúa del buque.

En cambio en los gráficos siguientes observamos como la distancia óptima a bloque es inversamente proporcional al rendimiento de grúa.

⁶ El rendimiento de grúa es igual a su frecuencia. Ciclos por hora o movimientos por hora.

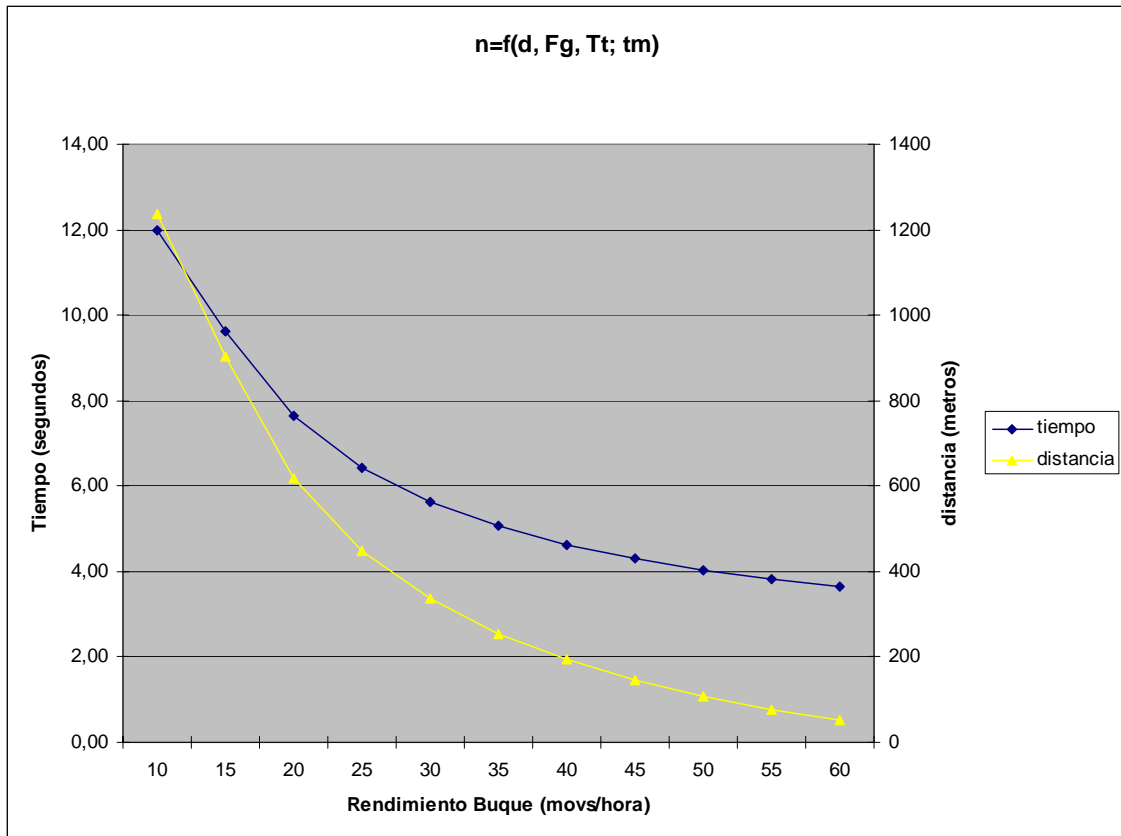


Gráfico 2 Distancia y tiempo en función del rendimiento de buque con velocidad de straddlecarrier de 17 km/h y número de máquinas 2.

En el gráfico anterior vemos que para rendimientos de grúa superiores a 30 movimientos hora la distancia óptima es inferior a 400 metros, lo cual es difícil de conseguir en una terminal de dimensiones medias. En estas circunstancias equilibramos los ciclos en función del número de máquinas por grúa.

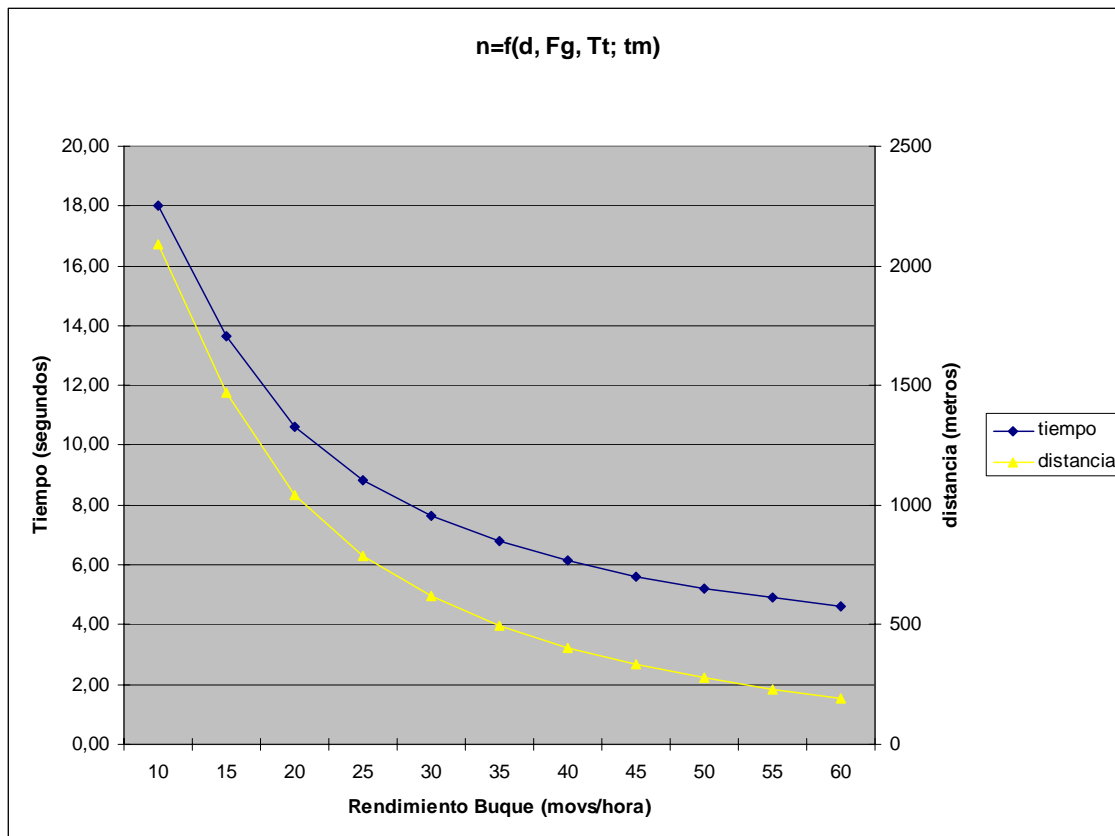


Gráfico 3 Distancia y tiempo en función del rendimiento de buque con velocidad de straddlecarrier de 17 km/h y número de máquinas 3.

En los gráficos anteriores el tiempo se corresponde con un ciclo completo es decir en ir y volver. Por supuesto que el recorrido es igual a la distancia multiplicada por dos.

3.2.4 Conclusión

La conclusión es que las distancias óptimas se calculan inicialmente al diseñar las planificaciones de los diferentes Servicios⁷ aunque en la operativa diaria la variable que nos permite equilibrar el ciclo del sistema es el número de máquinas que asignamos a cada grúa.

3.3 Planificación de explanada. Objetivo

El objetivo es ordenar y organizar la asignación de espacio teniendo en cuenta el inventario de las diferentes líneas y sus flujos (exportación, importación, transbordos y vacíos) así como su rotación para obtener el máximo rendimiento de explanada.

⁷ Conjunto de armadores que componen buques en una línea regular.

Los inventarios nos darán el máximo espacio asignable y la rotación determinará su tamaño dinámicamente en función del tiempo, es decir el espacio a asignar para la exportación será mínimo al terminar la escala y máximo justo en el momento de comenzar, para la importación justo lo contrario máximo al terminar la escala y mínimo antes de la escala, es decir la asignación en función del tiempo variará según el tipo de movimiento.

3.3.1 Nomenclatura

C	= total de TEUS en terminal
J	= tipo de movimiento (export, import, etc.)
I	= número total de líneas
ij	= partida ij. Línea i, tipo de movimiento j (import, export, etc.)
Base	= TEUS por bloque a índice 1
B	= número máximo de bloques
B _{oc}	= número de bloques a ocupar
n	= índice de altura
N	= índice de altura máximo
R _T	= rendimiento total
S	= remociones
b _{ij}	= número de bloques a ocupar por partida
x _{ij}	= índice de altura teórico, todos los TEUS en un solo bloque
y _{ij}	= índice de altura real por partida
c _{ij}	= número de TEUS por partida
r _{ij}	= rendimiento por partida
m _{ij}	= asignación mínima de bloques por partida
a	= estancia de los containers

3.3.2 Ecuación de rendimiento de explanada

La función objetivo a maximizar es el rendimiento de explanada sujeta a restricciones. Esta función nos dará el espacio a asignar a cada partida para que el rendimiento sea máximo teniendo en cuenta ciertas restricciones.

Siendo el índice de altura teórico de la línea “i” y el tipo “j”

$$x_{ij} = \frac{c_{ij}}{base}, \quad \text{Ecuación 3-7}$$

y el índice de altura real

$$y_{ij} = \frac{x_{ij}}{b_{ij}}, \quad \text{Ecuación 3-8}$$

y teniendo en cuenta que la ecuación aproximada del rendimiento es según veremos más adelante,

$$R = \frac{2}{n+1}$$

siendo n el índice de altura medio y sustituyendo por los índices parciales,

$$r_{ij} = \frac{2}{y_{ij}+1}$$

la ecuación anterior nos da el rendimiento parcial por partida, entonces podemos optimizar la asignación total maximizando la función rendimiento u objetivo,

$$R = \frac{1}{C} \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I \frac{2}{y_{ij}+1} c_{ij}, \quad \text{Ecuación 3-9}$$

utilizando las siguientes funciones auxiliares,

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 \rightarrow \text{si } c_{ij} > 0 \\ 0 \rightarrow \text{si } c_{ij} = 0 \end{cases}, \text{ para asegurar la asignación}$$

$\alpha_{ij} = \frac{x_{ij}}{m_{ij}}$, para limitar los índices por partida, siendo α_{ij} el índice máximo asignado a cada partida.

Con las siguientes restricciones,

$$\sum b_{ij} \leq B_{oc}$$

$$\delta_{ij}/base \leq b_{ij} \leq x_{ij}, \forall i,j; \text{ para asegurar asignación de espacio si } c_{ij} > 0$$

$$b_{ij} \geq m_{ij}, \text{ para limitar el índice de ocupación altura al ser siempre } y_{ij} \leq \alpha_{ij}$$

$$b_{ij} \geq 0$$

La última restricción nos dice, con todas las variables b_{ij} positivas o iguales a cero.

Con este modelo obtenemos unas asignaciones b_{ij} , para cada partida, que maximizan el rendimiento de explanada respetando todas las restricciones. Por último, solo falta regular las asignaciones en función del tiempo de rotación del servicio⁸ y la estancia de los contenedores, con lo cual la dotamos de carácter dinámico con respecto al tiempo que falta para cada escala del servicio considerado.

Asignación dinámica para la importación:

⁸ Intervalo en días entre dos buques del mismo servicio.

Consideramos T el tiempo que tarda en salir un contenedor a partir del instante que finaliza la descarga del buque ($t=0$ origen).

Consideramos que T es una variable aleatoria que sigue una distribución exponencial, la probabilidad de que el tiempo de salida de un container sea superior a un tiempo t vendrá dada por

$$P(T > t) = e^{-\frac{t}{a}}, \quad t \geq 0$$

Donde a es el valor esperado de T y valor promedio de la estancia de los contenedores en explanada.

El número de contenedores presente en la explanada en un instante t será

$$M(t) = M \cdot P(T > t) = M \cdot e^{-\frac{t}{a}}, \quad \text{Ecuación 3-10}$$

siendo M el número de containers descargados.

Dado que b_{ij} es el número de bloques ocupados en el momento de terminar la descarga, la ocupación en un instante posterior t días después de la descarga será

$$b_{ij}(t) = b_{ij} \cdot e^{-\frac{t}{a}}. \quad \text{Ecuación 3-11}$$

Dado que a es la desviación típica de la variable T y considerando que la descarga ocupa 1 día, podemos considerar que después de $2a+1$ días no quedarán contenedores de esta descarga en explanada.

Asignación dinámica para la exportación:

En la exportación contamos el tiempo que falta para que el container cargue en la próxima escala. En este caso el tiempo será negativo si consideramos la escala como tiempo origen.

$$P(T > t) = e^{-\frac{t}{a}}, \quad t \leq 0$$

Esta es la probabilidad de que un container tenga que esperarse t días antes de ser cargado en la próxima escala y por lo tanto el porcentaje de contenedores presentes en explanada t días antes de la salida y la ocupación será

$$b_{ij}(t) = b_{ij} \cdot e^{-\frac{t}{a}}, \quad t \leq 0 \quad \text{Ecuación 3-12}$$

En ambos casos t son los días que han pasado o faltan desde o hasta el momento de la escala del buque, siendo $t = 0$ el día en que se realizan las operaciones de carga y descarga.

En el siguiente gráfico vemos el flujo de la exportación a la izquierda y el de la importación a la derecha, en ambos casos tenemos las curvas de flujo diario y acumulado.

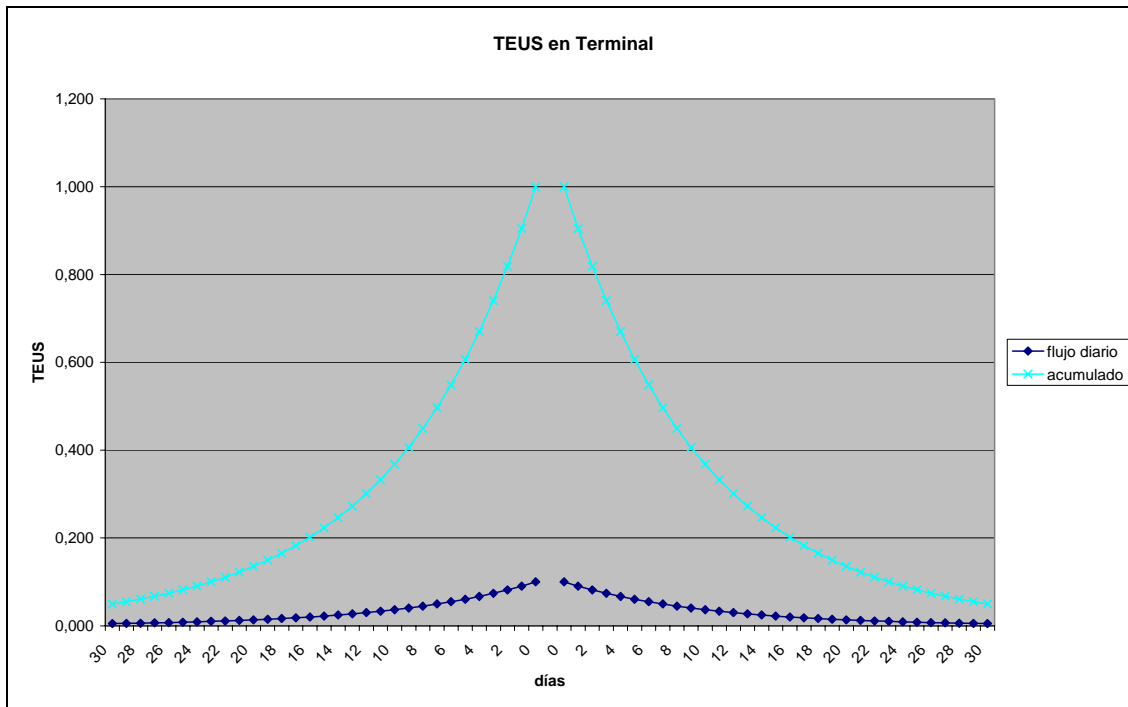


Gráfico 4 Flujo diario y acumulado en TEUS, para una misma estancia a para la exportación (izquierda) e importación (derecha).

El gráfico anterior muestra el comportamiento del flujo de containers para una escala en concreto, es decir en la Terminal solo operamos un buque semanalmente. Pero si consideramos que operan 4 ó 5 buques diarios con sus cargas y descargas, con cantidades y tiempos de operación distintos, tendremos un gráfico como el siguiente donde podemos ver el comportamiento de los diferentes flujos y escalas de forma conjunta.⁹

⁹ Los datos han sido tomados de forma empírica. Elaboración propia.

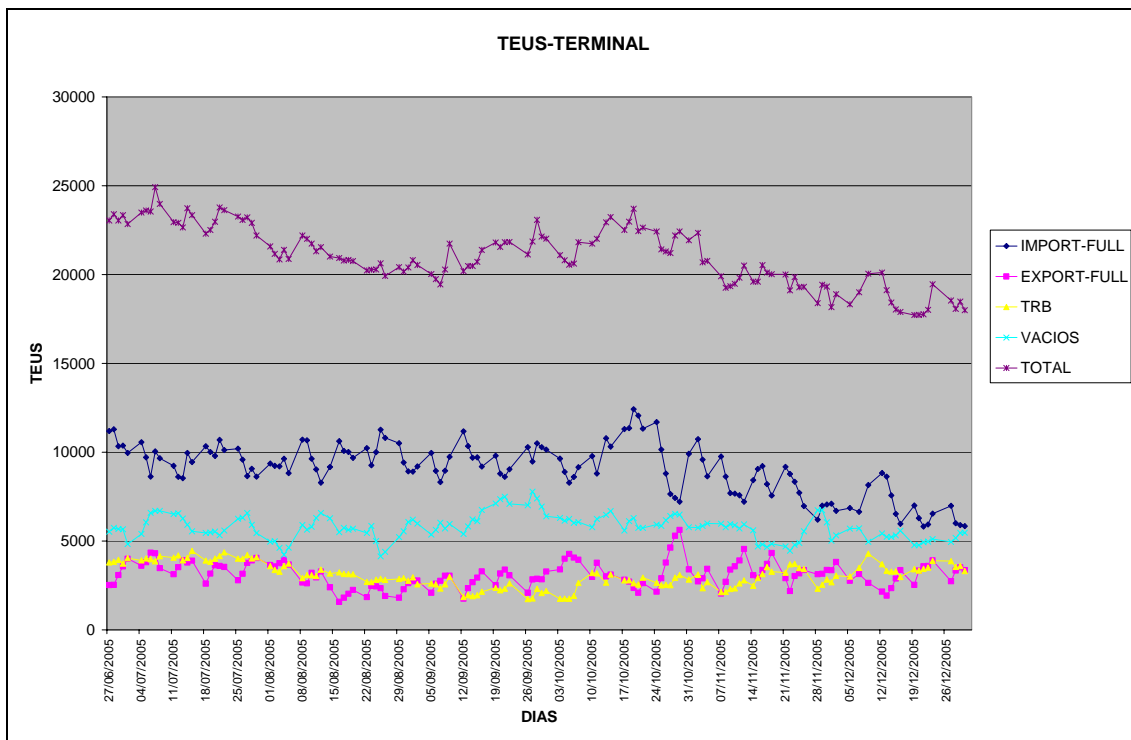


Gráfico 5 Stock acumulado para los diferentes flujos exportación, importación, trasbordos, vacíos y total durante un periodo de seis meses.

3.4 Estudio del rendimiento en función del tráfico. Generalidades de la circulación

El estudio de la circulación tiene como objetivo el conocimiento de su comportamiento, tanto en su aspecto general como en particular de la circulación en un tramo o periodo determinados y su incidencia en el rendimiento operativo de la Terminal .

Conociendo las causas y los efectos del fenómeno observado se podrá intervenir en la infraestructura, organización, vehículos y usuarios.

En este apartado haremos una breve introducción al estudio de los modelos de tráfico¹⁰, para terminar con un ejemplo del comportamiento de una terminal en función de la intensidad, densidad y velocidad del tráfico.

3.4.1 Tipos de modelos y variables

- Modelo macroscópico: Estudia el tráfico como un flujo continuo que se rige por unas leyes propias. Este modelo presenta una mayor facilidad en la obtención de datos (Intensidad, Densidad, Velocidad).

¹⁰ Gardeta, G.J. Elementos de Ingeniería del Tráfico. 3ª ed. Madrid: Colegio de Ing. de Caminos Canales y Puertos, 1995.

- b) Modelo microscópico: Se crean modelos observando el comportamiento de los vehículos individualmente. El conjunto se obtiene integrando los componentes individuales.

3.4.2 Principales variables

La Intensidad

La intensidad es el número de vehículos que pasan por una sección fija por unidad de tiempo.

La IMD (Intensidad Media Diaria) sirve de base para definir las tendencias y evolución del tráfico en una vía o circuito dado.

La intensidad sigue una variación compuesta por una tendencia a largo plazo, unas variaciones cíclicas (anuales, semanales, diarias y horarias) y unas variaciones puramente aleatorias.

Las fluctuaciones durante largos periodos pueden llegar a saturar las vías, para tener en cuenta estas variaciones se corrige la intensidad horaria por un factor (factor de hora punta) y así poder corregir la capacidad para estas puntas de tráfico.

Las intensidades horarias son las que finalmente definen las características necesarias para poder absorber la demanda de tráfico y debido a su variabilidad hay que tener en cuenta su distribución de frecuencias a la hora de definir un proyecto.

Para comparar distintas vías se utiliza la relación I_H/IMD anual, donde la máxima I_H puede llegar a ser de un 20% de la IMD. En la práctica se escoge como representativa la intensidad horaria que excede en 30 horas al año la capacidad (Intensidad en la Hora 30), en la mayoría de los casos la intensidad en la hora 30 oscila entre un 11% y un 17% la IMD anual.

La Velocidad

- a) *Velocidad instantánea* es la velocidad en un momento determinado.
- c) *Velocidad de recorrido* es la velocidad media conseguida al recorrer un tramo dado.
- d) *Velocidad media espacial* es la velocidad media de todos los vehículos que en un instante determinado están en un tramo dado.
- e) *Velocidad media temporal* es la velocidad media de todos los vehículos que pasan por un perfil fijo durante un cierto periodo de tiempo.
- f) *Velocidad media de recorrido* es la media de las velocidades de recorrido de todos los vehículos en un tramo dado.

Distribución de Frecuencias de Velocidades

- a) *Distribución temporal*, si se miden las velocidades de los vehículos cuando estos pasan por un perfil fijo.
- b) *Distribución Espacial* si se miden las velocidades de todos los vehículos que en un instante dado están en un tramo determinado.

Ambas distribuciones son distintas pero están estrechamente relacionadas, para estudios de trazado o de regulación del tráfico se utiliza la velocidad del percentil 85 que es alrededor de un 20% superior a la media.

Para grupos homogéneos de vehículos las distribuciones de frecuencias se pueden adaptar fácilmente a la distribución normal.

Finalmente y aunque sea obvio hacer notar que los factores que más afectan a la velocidad son la Intensidad, Trazado, Regulación y Pavimento.

Densidad del Tráfico

Se denomina densidad del tráfico al número de vehículos que existen por unidad de longitud. La densidad máxima será igual al producto de la inversa de la longitud media de los vehículos por el número de carriles, en estas condiciones los vehículos estarán parados.

$$s = d(\text{intervalo_hueco}) + L(\text{vehículo}) \quad \text{Ecuación 3-13}$$
$$D = 1 / S_m$$

Está claro que cuando la densidad es máxima el *intervalo-hueco* es cero y $S = L$, siendo (3-13) el número de vehículos por unidad de longitud pegados unos con otros y parados.

Tiempos de Recorrido y Demoras

En determinadas vías o circuitos la velocidad sufre grandes cambios llegando incluso a parar. En estos casos las velocidades son poco representativas y es preferible trabajar con tiempos de recorrido y demoras.

Intervalos entre vehículos

El valor medio de los tiempos que transcurren entre el paso sucesivo de vehículos por un punto fijo durante un periodo de tiempo, es lo que se llama intervalo temporal h_m , que está relacionado con la intensidad por la ecuación,

$$h_m = 1 / I \quad \text{Ecuación 3-14}$$

con intensidades no muy elevadas, la distribución de frecuencias se aproxima muy bien con una exponencial negativa,

$$P(h > t) = e^{-It} \quad \text{Ecuación 3-15}$$

con intensidades muy elevadas los intervalos son muy cortos pero teniendo en cuenta que los vehículos no tienen longitud "cero" la probabilidad de que esto suceda debería de ser cero, en cambio (3-15) sigue dando una probabilidad no nula. Por lo tanto (3-15) como se ha dicho antes es válida para intensidades no muy elevadas.

Para intensidades altas se aproxima mejor,

$$P(h > t) = a e^{-I_1(t-d)} + (1-a) e^{-I_2(t-d)} \quad \text{Ecuación 3-16}$$

Donde los parámetros a , d , I_1 e I_2 se estiman a partir de las medidas realizadas.

3.4.3 Relaciones entre I, V, y D

3.4.3.1 Relación fundamental

Cuando se proyecta una nueva vía o un acondicionamiento de una ya existente a partir de una intensidad que circulará por ella podemos estimar la velocidad y la densidad por medio de unas relaciones $R(I,D)$ y $R(I,V)$ determinadas en una vía ya existente de características análogas.

Siendo I , D las variables y $f_t(V)$, $f_e(V)$, las funciones de densidad correspondientes a la velocidad temporal y espacial respectivamente, entonces el número de vehículos con velocidades entre V y $V+dV$ que pasarán por una sección "A" en el intervalo $t \rightarrow t + dt$ será,

$$f_t(V)dV \cdot I dt,$$

estos vehículos son los que estarán en un tramo $V dt$ en el instante t es decir,

$$f_e(V)dV \cdot D \cdot V dt$$

entonces,

$$f_t(V)dV \cdot I dt = f_e(V)dV \cdot D \cdot V dt \quad \text{Ecuación 3-17}$$

integrando,

$$I \int f_t(V)dV = D \int V \cdot f_e(V)dV$$

esta integral es el primer momento de V alrededor del origen, por lo tanto esto es la velocidad media espacial dado que la función de distribución es espacial,

$$I = D \cdot V_e \quad \text{Ecuación 3-18}$$

Siendo V_e la velocidad media espacial, esta relación liga las tres magnitudes fundamentales y relaciona las distribuciones de velocidad espacial y temporal entonces teniendo en cuenta (3-17) y (3-18) tendremos,

$$f_t(V) \cdot I = f_e(V) \cdot D \cdot V$$

$$D \cdot V_e f_i(V) = f_e(V) \cdot D \cdot V$$

$$V_e f_i(V) = f_e(V) \cdot V$$

integrando con relación a V ,

$$\frac{1}{V_e} \int_0^{\infty} f_e(V) dV = \int_0^{\infty} \frac{f_i(V)}{V} dV \quad \text{Ecuación 3-19}$$

y de aquí,

$$\frac{1}{V_e} = \int_0^{\infty} \frac{1}{V} f_i(V) dV \quad \text{Ecuación 3-20}$$

es decir que la velocidad media espacial coincide con la media armónica de la distribución temporal¹¹, multiplicando ambos miembros de (3-19) por V^2 tendremos que la velocidad media temporal será,

$$V_t = \frac{1}{V_e} \int_0^{\infty} V^2 f_e(V) dV = \frac{1}{V_e} (\sigma_e^2 + V_e^2)$$

ya que la varianza de cualquier variable aleatoria es el segundo momento alrededor del origen menos el cuadrado de la media entonces,

$$V_t = V_e + \frac{\sigma_e^2}{V_e} \quad \text{Ecuación 3-21}$$

En resumen (3-19) enlaza las tres variables macroscópicas básicas del tráfico y cuya representación gráfica sería una superficie definida por dicha ecuación.

3.4.3.2 Relación velocidad – densidad

La velocidad media es una función de la densidad que es máxima cuando ésta es casi cero, disminuyendo hasta anularse cuando la densidad es máxima.

Esta función variará de unas vías a otras, si representamos V en $f(D)$ midiéndola en vehículos por Km y carril se obtienen unas curvas en las que las mayores variaciones entre los diferentes tipos de vías se obtienen para zonas de baja densidad.

¹¹ $V_e = \frac{1}{\int_0^{\infty} \frac{1}{V} f_i(V) dV}$

La forma de la curva será de una exponencial negativa que tendrá su máximo para una densidad casi cero y un mínimo cuando la densidad de una distancia íter vehicular de casi cero.

3.4.3.3 *Relación intensidad – densidad*

Cuando la densidad sea cero también lo será la intensidad y cuando la densidad alcance su valor máximo también se anulará la intensidad por anularse la velocidad media. Entre ambos extremos la intensidad tendrá valores positivos y por consiguiente también alcanzará un máximo y a la capacidad correspondiente se la designará como capacidad de la vía o densidad crítica.

En consecuencia la intensidad en función de la densidad será una función convexa con un máximo para un cierto valor de la densidad.

Además para cada valor de la intensidad menor que la densidad crítica le corresponden dos valores distintos de la densidad, uno menor que la crítica y otro mayor, esto divide al diagrama en dos zonas, una de tráfico fluido (la ascendente) y otra de tráfico inestable (la descendente) de menor pendiente en la parte de densidades altas.

Este diagrama se conoce como diagrama fundamental del tráfico, y en el puede obtenerse para cualquier punto la I , D , y la V siendo esta igual a la tangente de alfa,

$$tg\alpha = \frac{I}{D} \quad \text{Ecuación 3-22}$$

Se estima que la densidad crítica suele ser del orden del 30% al 40% de la máxima.

3.4.3.4 *Relación velocidad – intensidad*

La intensidad y la velocidad son las magnitudes que mejor definen la demanda y el funcionamiento de la circulación, como en el caso de la curva $I - D$ se presentan dos velocidades para cada valor de la intensidad, o sea para cada valor de la variable independiente (I) corresponden dos de la dependiente (V), la parte superior de la curva corresponde a una circulación fluida y estable y la inferior a una circulación congestionada e inestable.

La forma del diagrama se corresponde con el de la curva $I - D$ pero girada 90° en sentido de las agujas del reloj.

3.4.4 Aplicación a un circuito de maquinaria pesada de una terminal de contenedores

En una terminal de contenedores difícilmente se va a llegar a la congestión salvo en zonas muy concretas de tráfico externo (camiones), o poza (a pie de grúas) donde se producen colas, pero conocer el comportamiento del tráfico y sus variables siempre es un dato significativo de cara al rendimiento de las operaciones.

Las variables más significativas en el comportamiento del tráfico en una terminal se puede decir que son el número de camiones que están en zona de servicio, (aduana, *buffers* o esperando salida) y el número de máquinas que están dando servicio a buques y camiones.

La eficiencia del tráfico es proporcional a la capacidad de la infraestructura viaria de la terminal, a su organización y a su regulación.

Orientativamente, una terminal trabajando al 100% de su capacidad es decir con el máximo de máquinas para buques y camiones puede bajar su rendimiento del orden de un 25% con relación a una carga de trabajo media y concretamente la velocidad de las máquinas baja un 33% aproximadamente en las mismas condiciones.

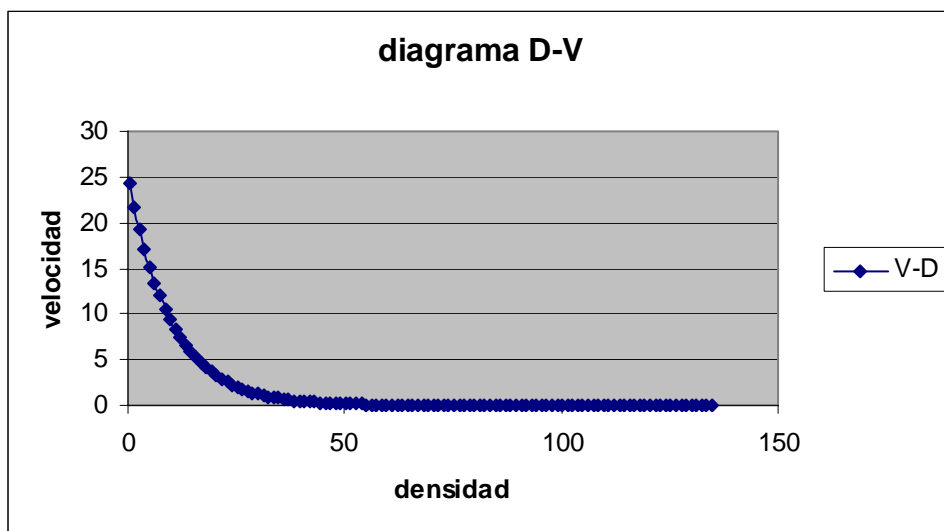


Gráfico 6 Velocidad en función de la densidad de tráfico

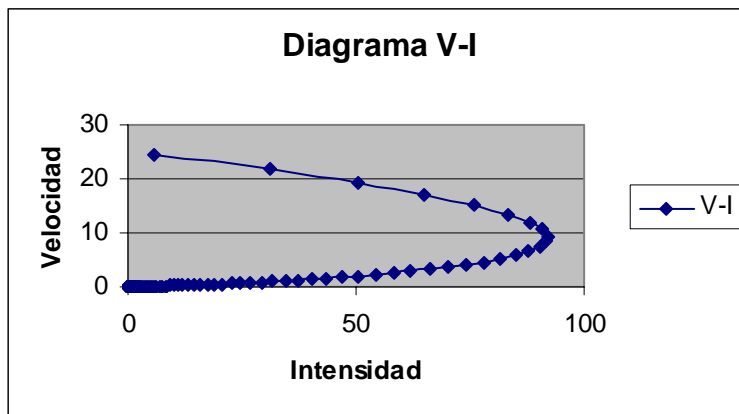


Gráfico 7 Velocidad en función de la intensidad de tráfico

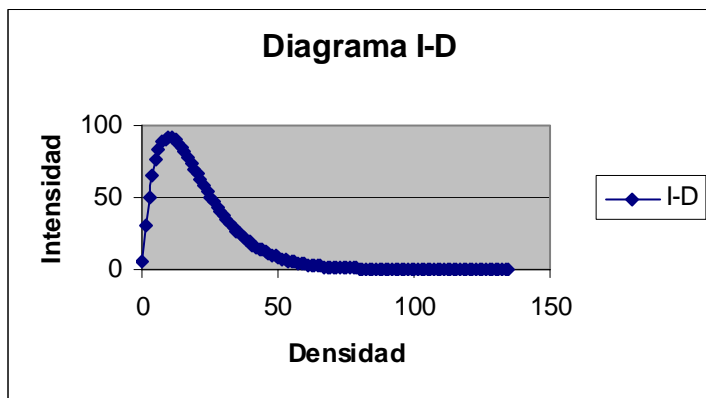


Gráfico 8 Intensidad en función de la densidad de tráfico

Las figuras precedentes ilustran de modo genérico y sin tener en cuenta las zonas conflictivas, el comportamiento del tráfico en una terminal ficticia¹² con una infraestructura de 4200 metros de longitud de vías.

En estas condiciones es determinante la organización y regulación de la infraestructura viaria y operativa con respecto al tráfico, sobretodo en zonas críticas como *buffers*, poza, colas en puertas, colas en aduanas, rotondas y zonas separadas para el transporte de personal.

3.4.5 Organización en zonas críticas

En la poza, es decir en la parte del muelle donde los contenedores pueden ser manipulados por las grúas, puede haber congestión cuando las grúas operen unas muy cerca de otras formándose tubos. En estos casos deben asignarse calles a las distintas manos así como el sentido de la circulación.

¹² Elaboración propia.

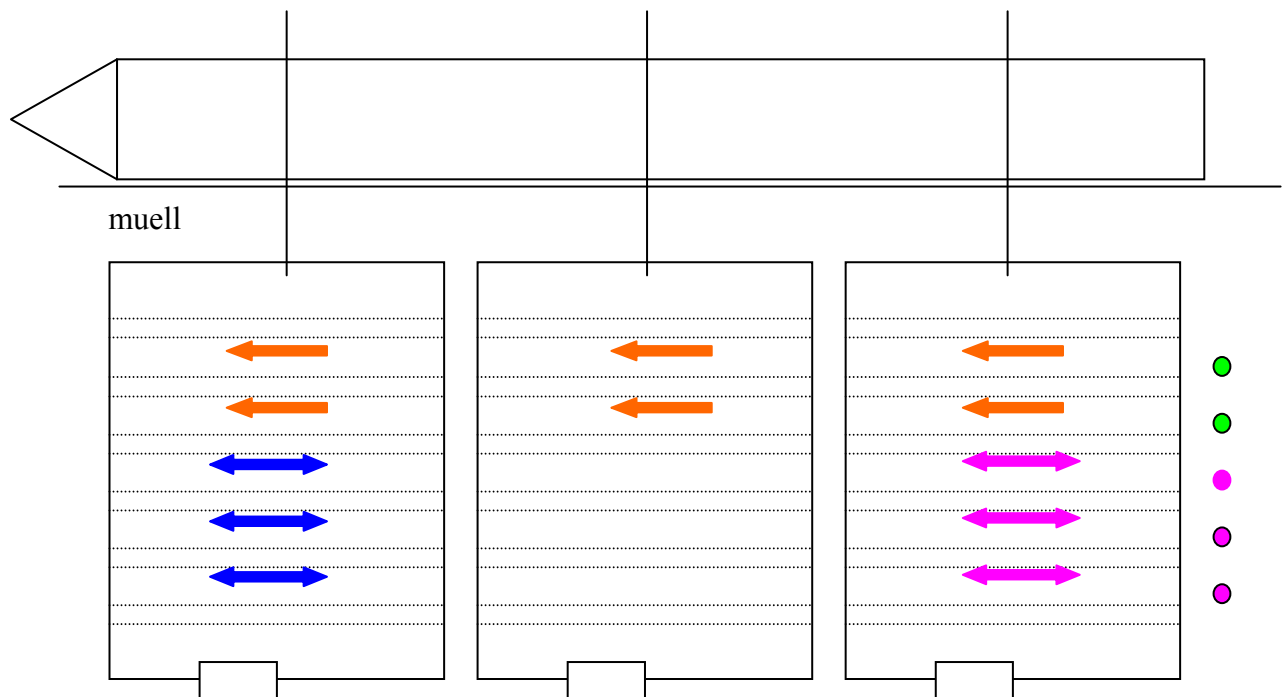


Figura 4 Organización del tráfico entre patas de grúa, en una situación de tubo

En el caso de la figura precedente hay tres manos operando un mismo buque y dada la proximidad de las tres grúas se ha formado un tubo. Esta sería una manera de organizar el tráfico si bien hay que tener siempre en cuenta:

- que las puertas de los contenedores normalmente han de ir hacia la popa del buque
- la seguridad del confornta. Que solo este pendiente de sus máquinas
- evitar el máximo de maniobras entre patas de grúas

En estas condiciones la mano de proa (azul) entra con las máquinas marcha atrás y sale marcha adelante por las calles 1, 2, y 3, la mano del centro (naranja) entra por la popa y sale por la proa del buque aunque solo por las calles 4 y 5 (banda mar), la mano de popa (fucsia) entra marcha adelante y sale marcha atrás por las calles 1, 2, y 3.

Este procedimiento solo se activaría en caso de formación de tubos, en los demás casos cada mano utilizaría todas las calles disponibles entre patas de su grúa, entrando por popa y saliendo por proa, en relación al buque.

En los Buffers también debe de haber un procedimiento para la maniobra de carga y descarga de los camiones dependiendo del layout de la terminal, que facilite y agilice la maniobra de las máquinas y de los camiones. Normalmente los camiones deben hacer un circuito en U desde y hacia las puertas, de manera que el circuito que siguen tiene el mismo origen y final, independiente del circuito de las maquinas.

En cuanto a lo que es *Aduana y Puertas* más que tratarse de un procedimiento de operativa con relación a las máquinas se trata de un problema de colas y de organización de los tiempos de servicio así como de layout.

3.5 Asignación de manos. Generalidades

Cuando se planifica la operativa diaria de una terminal debemos de tener en cuenta tanto la cantidad y tipo de maquinaria como la cantidad y tipo de personal necesarios. Todo ello en función de las cargas de trabajo que prevemos tener en buques y transferencia.

La asignación de medios para buques se cuantifica por el número de manos. La mano o cuadrilla es el equipo de personal asignado a cada grúa según las diferentes especialidades, es decir, capataz, bordos, sobordista, gruista, confronta y manipulantes de maquinaria de explanada. La asignación de personal de transferencia se cuantifica por el número total de maquinaria, según tipo, y manipulantes en función de la carga de trabajo prevista.

VARIABLES Y PARÁMETROS A TENER EN CUENTA:

- El número de buques a operar
- Los movimientos por buque
- La distribución de movimientos en cada buque (*split*)

CONSIDERANDO:

- Las estibas, si están muy concentradas o por el contrario muy dispersas en pequeños picos
- Los posibles cambios de buque
- El número total de manos por buque
- Las intensivas por buque
- El coste de las diferentes intensivas
- La banda de atraque, en función de que banda está más cargada, alturas de las cubiertas y urgencia de atraque/desatraque
- Grúas a asignar por barrido y alturas
- Las distancias a bloque

Estas son las variables más significativas de lo que llamamos una operativa combinada, se trataría de diseñar un modelo capaz de facilitar la toma de decisiones a la hora de programar una de estas operativas.

3.5.1 Metodología. Generalidades

El procedimiento que se sigue es el siguiente, sea manual, mecánico o combinado:

1. Se toman los datos generales de la operativa de cada buque, es decir los movimientos de descarga, carga, remociones, BBC (*break bulk cargo* o no containerizada), y tapas.
2. Calculo de los *splits* de cada buque, para ver la distribución de los movimientos.
3. asignación de los atraques, teniendo en cuenta distancias a bloque, costado de atraque, barrido y alcance de las grúas.
4. Se asigna el número de máquinas por grúa en función de los recorridos entre grúa y bloques.
5. Se determinan las manos y las intensivas necesarias para cada buque, teniendo en cuenta los cambios de buque es decir los cambios de manos de un buque a otro.
6. Se establecen prioridades de atraque, básicamente en función de los ETAs¹³ y Ventanas¹⁴ previstas.

Durante un día laborable se programan y contratan las operativas de mañana y tarde a primera hora de la mañana y noche y madrugada a primera hora de la tarde.

Para fines de semana y festivos la programación se inicia a partir de la última intensiva de tarde del último día laborable hasta la primera intensiva de mañana de día laborable. Esta es la norma vigente para la mayoría de los puertos si bien pueden variar la duración de las intensivas así como las horas de inicio y terminación de éstas.

En resumen el procedimiento que se sigue es el descrito anteriormente con sus variaciones “locales” y más o menos mecanizado dependiendo del grado de sofisticación de los respectivos sistemas informáticos, del *Know-How* de las empresas estibadoras y usuarios¹⁵ locales.

3.5.2 Determinación del número de manos

Esta operación es la que determina la correspondencia entre cantidad de movimientos y manos asignadas por intensiva o periodo, ya que discrimina la cantidad de movimientos en función de su distribución en las diferentes bahías.

¹³ Estimated Time of Arrival.

¹⁴ Las Ventanas o *Windows* son unas reservas de atraque y número mínimo de grúas.

¹⁵ Consignatarios, transitarios, transportistas y clientes finales.

Por ejemplo, teniendo en cuenta que una intensiva tiene una duración de seis horas, que el promedio histórico del buque es de 25,5 movimientos-hora, la carga 200 movimientos, la descarga 300 movimientos, las remociones 60 movimientos, y las tapas 24 movimientos, tendremos que los movimientos totales suman 584 movimientos. Si tenemos en cuenta que durante una intensiva se harán 153 movimientos por grúa, esto quiere decir que para operar el buque necesitaremos 3.81 intensivas con una sola mano (grúa), o bien una sola intensiva pero con cuatro manos si la distribución de los movimientos, la estructura del buque y los costes nos lo permiten.

En cuanto a los costes hay que tener en cuenta que normalmente los costes de noche y madrugada y en la misma medida en fines de semana y festivos son mayores y puede ser que debido al precio que hemos acordado con la Línea nos sea más rentable trabajar en diurno, debido a que obtenemos un mayor margen de beneficio. Por supuesto a la Línea siempre le es más rentable trabajar de día a menos que vaya justa con el tiempo de rotación. En este último caso si hay buques fondeados a la espera de atraque la Línea puede verse obligada a trabajar de noche ya que si no perdería su turno.

En resumen cuanto más uniformemente distribuidos estén los movimientos más manos podrán operar en el buque, si bien una distribución con pocos movimientos por bahía bajaría el rendimiento de la operativa y no implicaría un mayor número de manos.

3.5.2.1 En función de la distribución de los movimientos

Para observar la distribución de los movimientos de un buque a lo largo de su eslora debemos utilizar alguna medida de dispersión que nos indique si la carga está muy concentrada, por ejemplo podríamos utilizar la varianza o la desviación estándar las cuales nos indicarán su desvío medio con respecto a la media.

No obstante estas dos medidas no son adimensionales y se ven afectadas por factores de escala o la unidad de medida de la variable. Necesitamos una medida de la dispersión abstracta y que no se vea afectada por la escala de la unidad de medida para ello utilizaremos el *Coficiente de Variación de Pearson*,

$$V = \frac{s}{\bar{x}} \quad \text{Ecuación 3-23}$$

siendo s la desviación estándar y \bar{x} la media aritmética de la muestra. De esta manera eliminamos la incertidumbre que nos provocaría decir que por ejemplo la desviación estándar del buque XXXX es de 50 movimientos, pero cincuenta ¿sobre qué?, no es lo mismo una desviación de 50 sobre una media de 200 movimientos por bahía que sobre otra de 70, en este último caso la distribución está totalmente desequilibrada. En cambio si decimos que el coeficiente de variación es del 10% entendemos que la desviación es un 10% sobre la media, lo cual nos da una idea de cómo vienen distribuidos los movimientos.

Entonces el *Split* mediante el Coeficiente de Variación de Pearson nos indica el grado de distribución de los movimientos. Cuanto más distribuidos tenemos los movimientos

EL SISTEMA OPERATIVO DE UNA TERMINAL DE CONTENEDORES MARITIMA. INTRODUCCION

más grúas podrán trabajar en un buque, si bien como hemos visto antes una excesiva distribución con pocos movimientos bajaría el rendimiento y el número de manos.

Linea		XXX		15/09/01 21:03			YYYY									
Nº MANOS		3	ETA	12(03:00)	BANDA DE ATRAQUE			ERmod xy		G1-G2-G3						
dest	trinca	BAY	DESC	TAPAS	R/S	CARGA	TAPAS	R/S	TOTAL MOVS	OBSERVACIONES	MANOS					
											1ª	2ª	3ª	4ª		
		1 / 3				16			16							
		5 / 7	42	2		46	2		92							
		9 / 11				3			3							
	20'	13 / 15														
		17 / 19	95	2		54	2		153							
	20	21 / 23				19	4		23							
		25 / 27	42	1		22	1		66	S/STRINCA						
	20''	29 / 31	53	1		7	1		62							
		33 / 35	51	1		53	1		106							
	20'	37 / 39				5			5							
		41 / 43	42	2					44	S/STRINCA						
	20'	45 / 47	90	3		64	3		160							
		50	37			29			66							
		53 / 55	28	3		65	3		99							
		57 / 59				5			5							
		62	23			23			46							
	20		503	15		411	17		946					331	293	322

Figura 5 Split operativo de un buque con 3 manos y sus respectivas secuencias de trabajo

3.5.2.2 En función de su estructura

El número de bahías aumenta con la eslora del buque aunque no linealmente ya que unos buques tienen más metros lineales de acomodación que otros, también la estructura del castillo y la toldilla puede variar, por lo que para calcular el número de manos en función de la estructura no vamos a utilizar la eslora sino el número de bahías, máxime cuando éste es conocido con la suficiente antelación por la Terminal.

Entonces para calcular el número máximo de manos en función del número de bahías tendremos en cuenta que la distancia mínima entre centros de grúa deberá ser de dos¹⁶ bahías de cuarenta pies y que cada grúa tendrá asignadas un número de bahías de tres o múltiplo de tres, además si suponemos que los movimientos están igualmente distribuidos en todas las bahías del buque tendremos que el número de manos será,

$$M_b = \frac{B}{3} \quad \text{Ecuación 3-24}$$

Siendo B el número bahías y M_b el número de manos en función del número de bahías.

3.5.2.3 En función de los movimientos

Además de la estructura y la distribución el otro factor determinante para decidir el número de manos será el total de los movimientos a realizar,

$$M_w = \frac{W}{R_G * h} \quad \text{Ecuación 3-25}$$

Siendo R_G el rendimiento histórico de grúa para el buque tipo, W los movimientos y h las horas por intensiva M_w será el número de manos en función del total de movimientos.

3.5.2.4 En función del coste

El coste de una intensiva no es el mismo en jornadas diurnas que jornadas de noche, madrugada, fin de semana o festivo, por lo tanto los beneficios estarán en función de los precios contratados con cada Línea.

Normalmente el margen de beneficio es variable como consecuencia de que el precio no se incrementa aproximadamente en la misma proporción que los costes, no obstante este margen debe de calcularse para cada Línea. Esto es debido a que las condiciones de los contratos varían y en algunos casos es más rentable trabajar al mínimo coste, es decir en jornadas diurnas y laborables.

3.5.2.5 En función del rendimiento

Cuantas más manos estén operando en uno o más buques más tráfico habrá en la poza, menos velocidad y menos rendimiento por máquina y por lo tanto menos rendimiento de grúa. En este caso nos encontramos con una contradicción, cuanto mayor sea el número de grúas (G) mayor será el rendimiento del buque por hora de operativa, en

¹⁶ En algunos casos distancia mínima es de una bahía de 40'. Esta es una limitación estructural del buque tipo.

cambio también es cierto que a mayor número de grúas menor será el rendimiento de cada una de ellas debido al aumento de la intensidad del tráfico, entonces tendremos una función de este tipo,

$$R_B = f(R_G, G). \quad \text{Ecuación 3-26}$$

Siendo R_G el rendimiento de grúa y R_B el rendimiento de Buque. Es decir el rendimiento del buque será función del rendimiento de grúa y del número de estas.

3.5.2.6 Determinación del número máximo de manos

El número máximo de manos que podrá operar un buque simultáneamente no significa necesariamente que sea el óptimo, sino que simplemente nos referimos a la cantidad máxima de grúas trabajando simultáneamente en función de la estructura del buque (B), la distribución del trabajo (D) y al total de movimientos (W) entonces,

$$M_{\max} = f(B, D, W) \quad \text{Ecuación 3-27}$$

En resumen se puede decir que el número máximo de manos será función del número de bahías, distribución y cantidad de movimientos.

3.5.2.7 Determinación del número óptimo de manos

Finalmente para determinar el número óptimo de manos filtramos el máximo por movimientos totales (W), estructura (B), distribución (D), costes de las diferentes intensivas (C) y tráfico (T), entonces,

$$M_{OP} = f(B, D, W, C, T). \quad \text{Ecuación 3-28}$$

Por ejemplo, si las manos necesarias por el número de movimientos es 5, pero por su estructura y distribución el máximo es de 4 manos, haríamos 4 en la primera intensiva y 1 en la segunda.

Si además tenemos en cuenta los costes y el tráfico, suponiendo que la primera intensiva es más cara que la segunda, haríamos 2 y 3 manos que sería la distribución óptima de las mismas. Si hicieramos 1 y 4 optimizaríamos costes pero por tráfico es más eficiente hacer 2 y 3.

3.6 Líneas de espera para atraques y grúas. Modelos

Para el estudio de la asignación de atraques y grúas vamos a describir primero el modelo heurístico, después se hará una breve descripción de los modelos de colas y simuladores.

3.6.1 Modelo heurístico

El procedimiento que se sigue para la asignación de atraques es el siguiente:

- El Operador o el Agente informan de la cantidad total y tipo de movimientos y ETA del buque.
- Una vez que la Terminal tiene ETA y movimientos de todos los buques que van a operar asigna los atraques teniendo en cuenta:
 - La disciplina de la línea de espera es FIFO¹⁷, aunque con restricciones.
 - La Terminal debe de optimizar la línea de atraque por ciclos, minimizando los huecos por incompatibilidad de esloras.
 - Corregir los atraques minimizando los recorridos de explanada.
 - Corrección por el tipo de grúas, es decir a los grandes buques oceánicos se les deberán asignar grúas *Post-panamax* para los de tamaño mediano las *Panamax* y para los *feeders* las grúas más pequeñas o *Feeders*.
 - Corrección del atraque por calados.

Normalmente para cada ciclo de atraques se empieza asignando atraque para el buque de mayor eslora, que es el que tiene mayores restricciones debido al tipo específico de grúas que necesita, calados, etc., es decir la asignación va de mayor a menor eslora para un mismo grupo de buques que entran en un mismo ciclo de atraque.

3.6.1.1 Restricciones

Como se ha dicho antes la disciplina de la línea de espera es FIFO con restricciones, vamos a enumerar las más significativas:

- *Windows*: Son unos intervalos de tiempo que algunas Líneas tienen contratados con la Terminal, de manera que si sus buques llegan dentro de ese intervalo tienen asegurado el atraque y un número mínimo de grúas.

¹⁷ First In First Out.

- *Incompatibilidad de Eslora*: A veces la disciplina FIFO no se puede cumplir físicamente, por ejemplo si en un primer ciclo de atraques tenemos un gran número de buques pequeños y medianos, puede ocurrir que el hueco que se genere sea incompatible con la eslora del siguiente en la cola de espera y tengamos que aprovechar ese hueco con un buque que quepa en ese hueco, teniendo que esperar el grande a que se genere espacio suficiente para aceptar su eslora.
- *Costes*: Cuando el Operador tiene reserva de “Tiempo de Tránsito”¹⁸ prefiere bajar costes y trabajar en laborable y diurno.

3.6.2 Modelos matemáticos

Si aplicamos simuladores o modelos de colas podemos tener un control más eficiente al mejorar el índice de error, ajuste de los cálculos y una mayor rapidez en la toma de decisiones.

Aumentando la eficiencia de muelle también mejoramos la explanada si se consiguen acuerdos con los diferentes Servicios asignando *Windows* según sus *Schedules*¹⁹ *Pro forma*.

3.6.2.1 Simuladores

El objetivo es maximizar la rotación de la Línea de Atraque. Los simuladores se basan en el histórico de buques teniendo en cuenta eslora media, número de movimientos, ocupación de la línea de atraque y estancia de los buques. Vamos a ver los índices más significativos:

- Capacidad efectiva: Número de buques atracados en un intervalo de tiempo, siendo C_f la capacidad física de la línea de atraque y G la rotación del muelle o línea de atraque .

$$C_{ef} = C_f \times G$$

- Rendimiento de buque por metro lineal de atraque, siendo E la eslora.

$$R_L = \frac{R_B}{E}$$

¹⁸ Significa que va adelantado sobre el *Schedule* previsto.

¹⁹ Es la tabla de horarios del buque para una rotación completa, incluyendo llegada, tiempo de operación y salida de todos los puertos de la rotación.

- Grado de Ocupación GDO de la línea de atraque, cuanto más próximo esté a uno mayor rendimiento de la línea de atraque. Siendo L_{OC} los metros ocupados y L_A el total de metros disponibles.

$$GDO = \frac{L_{oc}}{L_A}$$

Podemos cuantificar la producción de la Línea de Atraque. Siendo P la producción en un intervalo de tiempo (mes, año).

$$P = L_{oc} \times R_L \times G$$

Resumiendo en función de la línea de atraque ocupada y su rendimiento lineal buscamos la máxima rotación y producción. Normalmente se considera que el GDO óptimo está entorno al 38%²⁰ un índice más alto no podría absorber puntas y produciría esperas (fondeos).

3.6.2.2 Modelo de líneas de espera²¹

Un sistema de líneas de espera es un proceso de nacimiento-muerte. Un nacimiento ocurre cuando un cliente llega al sistema y una muerte cuando abandona la instalación.

Este sistema está constituido por los clientes que van llegando a la instalación, un conjunto de servidores, un orden en que los clientes son atendidos y una capacidad de las instalaciones que puede ser infinita cuando estos esperan fuera de las instalaciones.

Estos modelos son procesos markovianos de nacimiento-muerte donde los nacimientos y muertes dependen del estado del sistema. Un caso especial son los procesos poissonianos en los cuales las probabilidades de nacimiento o muerte son independientes del estado del sistema.

Elementos que caracterizan las líneas de espera:

- *Patrón De Llegadas*: Intervalo o tiempo transcurrido entre las sucesivas llegadas de clientes, distinguiendo si los clientes llegan de uno en uno o en grupos. Puede ser un parámetro determinístico (si se conoce exactamente la tasa de llegada) o puede ser una variable aleatoria de la cual conocemos su distribución probabilística. Además puede ser independiente del estado del

²⁰ Es el GDO normalmente aceptado por terminales y armadores.

²¹ Bronson, R. Investigación de Operaciones. 1ª ed. México D.F.: McGraw-Hill, 1993. ISBN 97-010-0257-1.

Hall, R. W. *Queuing Methods: For Services and Manufacturing*. 1ª ed. Englewood Cliffs, New Jersey 07632: Prentice Hall, Inc., 1991. ISBN 0-13-744759-6.

Hillier, F.S.; Lieberman, G.J.; *Investigación de Operaciones*. 7ª ed. MÉXICO D.F.: McGraw-Hill Companies, 2002. ISBN 007-232169-5.

sistema o depender del número de clientes que se encuentran en el mismo. También es importante considerar si se producen rechazos o abandonos. Un rechazo ocurre cuando el cliente llega a las instalaciones y considera que la cola es demasiado larga, un abandono ocurre cuando un cliente que se encuentra en la línea de espera sale de la cola porque considera que la espera es demasiado larga.

- *Patrón De Servicio:* Tiempo que le toma a un servidor atender a un cliente, como en el caso anterior puede ser un parámetro determinístico o puede ser una variable aleatoria cuya distribución probabilística es conocida, también puede ser dependiente o independiente del estado del sistema es decir del número de clientes que se encuentran en las instalaciones en un instante dado.
- *Número De Servidores:* Según la configuración física del sistema o *layout* podemos distinguir: Una línea de espera un servidor, una sola línea varios servidores, varias líneas varios servidores y una sola línea varios servidores en serie.
- *Capacidad Del Sistema:* Número máximo de clientes tanto en línea de espera como en servicio. Si un cliente llega al sistema y las instalaciones están completas, se le negará la entrada y no se le permitirá esperar fuera, ya que esto representaría un incremento efectivo de la capacidad física. Un sistema que permite esperar fuera de las instalaciones se considera que tiene capacidad infinita.
- *Disciplina De La Línea De Espera:* Orden en que se atiende a los clientes. Esta puede ser: Primero en llegar primero en atenderse (FIFO), último en llegar primero en atenderse (LIFO), servicio en orden aleatorio (SIRO), ordenamiento según prioridades (GD).

La notación Kendall es la que se utiliza para especificar las características de una línea de espera, $v/w/x/y/z$ siendo v el patrón de llegadas, w el patrón de servicio, x representa el número de servidores, y define la capacidad del sistema y z la disciplina de la línea de espera.

En cuanto al tiempo entre llegadas o al tiempo de servicio se usará la siguiente terminología: Cuando los tiempos son determinísticos D , cuando se considere que es una variable aleatoria con una distribución exponencial negativa M , para una distribución de Erlang E_k siendo $k = (1, 2, \dots)$, para cualquier otra distribución G .

En el estudio de líneas de espera para atraques parece más adecuado considerar que los patrones de llegadas y salidas se comportan como una variable aleatoria con una

distribución exponencial para las llegadas y Erlang²² para los servicios, entonces el sistema de espera para atraques tendría la siguiente notación, $M/E_k/s/\infty/FIFO$.

Vamos a ver como se comporta una línea de espera en el caso más simple $M/M/1$ ²³, es decir un patrón de llegadas y servicios con variable aleatoria distribuida exponencialmente, un solo servidor, capacidad infinita y con disciplina FIFO. Este modelo se comporta como un modelo poissoniano de nacimiento muerte, es decir es independiente del estado del sistema.

Siendo $p_n(t)$ la función de densidad de probabilidad de la variable aleatoria x ($x=\{\text{tener } n \text{ elementos en el sistema}\}$) y p_n la probabilidad de que hallan n elementos en el sistema, la probabilidad de *estado estable*²⁴, si existe el límite, será,

$$p_n \equiv \lim_{t \rightarrow \infty} p_n(t) \quad \text{Ecuación 3-29}$$

Entonces si definimos λ como la tasa de llegadas y μ como la tasa de servicio, el *factor de utilización* ρ será,

$$\rho \equiv \frac{\lambda}{\mu}. \quad \text{Ecuación 3-30}$$

Siendo ésta la relación entre las tasas de llegadas y servicios, entonces si $\rho \leq 1$, las probabilidades de estado estable existen y están dadas por,

$$p_n = \rho^n (1 - \rho) \quad \text{Ecuación 3-31}$$

Para $\rho > 1$, el estado es inestable y las llegadas se producen a una tasa superior al tiempo de servicio, en consecuencia la el número de clientes en el sistema aumenta sin límite.

Las medidas de mayor interés serán:

- $L \equiv$ número promedio de clientes en el sistema

$$L = \frac{\rho}{1 - \rho} \quad \text{Ecuación 3-32}$$

- $L_q \equiv$ clientes en línea de espera

²² Erlang nos da la probabilidad para los primeros k tiempos con población inicial cero. Entonces en el momento t la población es igual o mayor que k si, y solo si ($T \leq t$). La distribución exponencial es un caso especial a de Erlang cuando $k=1$.

²³ Se utiliza esta notación cuando la capacidad es infinita y la disciplina de la cola es FIFO:

²⁴ Cuando el número de elementos en el sistema es constante.

$$L = \frac{\rho^2}{1 - \rho} \quad \text{Ecuación 3-33}$$

- $W \equiv$ tiempo promedio de permanencia en sistema

$$W = \frac{1}{\mu - \lambda} \quad \text{Ecuación 3-34}$$

- $W_q \equiv$ tiempo promedio en cola

$$W = \frac{\rho}{\mu - \lambda} \quad \text{Ecuación 3-35}$$

- $W(t) \equiv$ probabilidad de permanecer más de t unidades de tiempo en sistema

$$W(t) = e^{-\frac{t}{W}} \quad \text{Ecuación 3-36}$$

- $W_q(t) \equiv$ probabilidad de permanecer más de t unidades de tiempo en cola

$$W_q(t) = \rho e^{-\frac{t}{W}} \quad \text{Ecuación 3-37}$$

Otros Sistemas no se comportan como poissonianos, por ejemplo un $M/M/s$, siendo s el número de servidores, donde la tasa de salidas depende del estado del sistema, es decir si el número de clientes n es inferior al número de servidores entonces la tasa será, $n\mu$ pero si es superior será, $s\mu$ para todo n mayor que el número de servidores. Para un sistema $M/M/1/K$ ocurre algo parecido con la tasa de llegadas, siendo estas igual a λ para cualquier n menor que K (capacidad del sistema) y siendo cero para $n \geq K$. Por supuesto en un sistema $M/M/s/K$ se dan los dos casos es decir las tasas de llegada y salida dependen del estado del sistema.

Estos modelos no constituyen un proceso estrictamente poissoniano ya que los parámetros λ y μ no son constantes y dependen del estado del sistema. Como modelo para tales procesos se utilizan procesos markovianos generalizados de nacimiento-muerte.

3.6.3 Aplicación para un modelo de asignación de atraque y grúas

Problemática de un modelo $M/E_k/s$, considerando:

- Que el *patrón de llegadas* puede aproximarse bastante bien con una distribución exponencial con tasa media de llegadas λ y una frecuencia media de $1/\lambda$.

- El *patrón de servicio* podremos aproximarlo, no sin dificultad, a una distribución de Erlang con parámetro k igual al ciclo de ataque, difícil de definir por la heterogeneidad de las esloras, lo que implica que k o número de llegadas que componen un ciclo no sea constante.
- El número de *Servidores*, esta característica conlleva una problemática similar a la del punto anterior. Considerando el número de buques atracados y recibiendo servicio (es decir con grúa o grúas), como el número de servidores del sistema, con la problemática de la heterogeneidad de las esloras y cantidad de grúas por buque.
- La *Capacidad* será igual al número de buques en servicio en un ciclo determinado más los buques fondeados en espera. Es decir al número de servidores K más la capacidad del fondeadero F , a efectos de cálculo la consideraremos infinita.
- Por último la disciplina de la línea de espera es FIFO con las restricciones ya nombradas de *windows*, costes, eslora y urgencias.

En base a un modelo de este tipo y a unos índices históricos de producción se puede construir un modelo que facilite la toma de decisiones.

3.7 Líneas de espera para colas de camiones. Aplicación del modelo de colas

Este modelo tiene muchos menos problemas a la hora de analizar sus parámetros y variables, podemos decir que es un “clásico”, con los camiones que son los clientes y las puertas que son los servidores. Pero el sistema se complica una vez el camión se encuentra dentro de la terminal, al trabajar con varios servidores en paralelo y además para completar un servicio el cliente debe de pasar por varios servidores que ofrecen distintos servicios en serie.

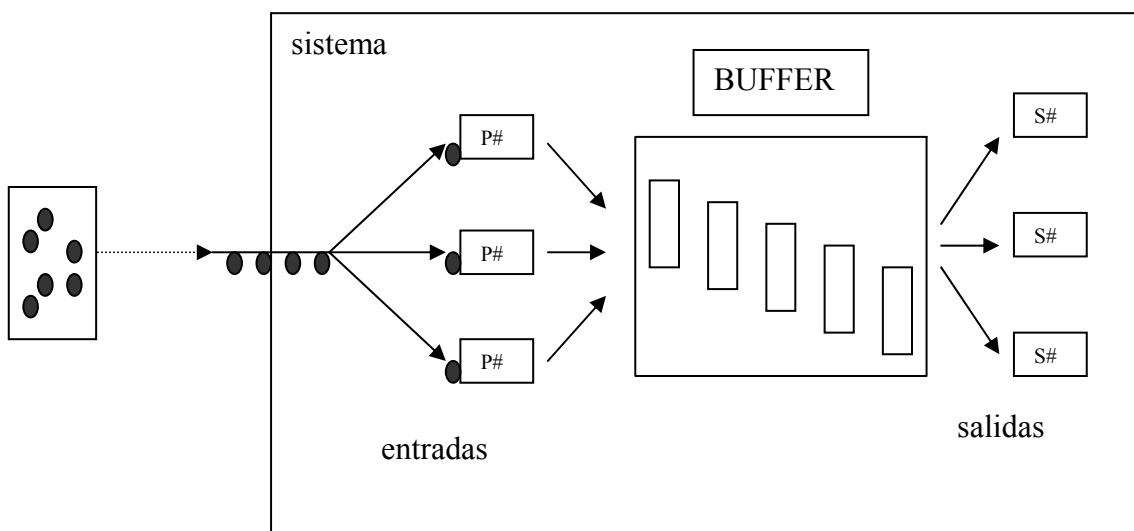


Figura 6 Servicios en serie, en un sistema de colas de camiones

En la figura precedente se ve con claridad lo que es un esquema típico de un sistema en el que los clientes entran en las instalaciones para recibir un servicio, pero se encuentran con varios servicios en serie, con uno o varios servidores para cada fase del servicio. Es decir es un servicio compuesto.

Este sería el modelo físico para una cola de camiones que entran a cargar o descargar en una terminal marítima de contenedores.

Como primera aproximación subdividiremos el sistema en tres subsistemas *puerta*, *buffers* y *salida*, para luego intentar agregarlos en un único sistema.

El modelo para la puerta sería no estrictamente poissoniano $M/M/p/\infty/FIFO$ siendo p el número de puertas de entrada, considerando que el subsistema no acepta clientes en espera dentro de las instalaciones pero si fuera del mismo y en consecuencia que la capacidad es infinita, que las llegadas y las salidas siguen una distribución exponencial, con varios servidores y disciplina de espera FIFO.

Para los buffers K el sistema sería $M/M/m/K/SIRO$, la capacidad del subsistema es finita e igual al número de buffers (no se permite esperar dentro de la Terminal), el número de servidores en lugar de ser el número de puertas es el número de máquinas m que atienden las operaciones de explanada y la disciplina de espera es aleatoria ya que los camiones esperan en el buffer que se les asigne a ser atendidos en función a unas prioridades de optimización de recorrido de las máquinas.

Para la salida sería $M/M/s/K+s$, donde los patrones de entrada y salida siguen siendo exponenciales, el número de servidores es el número de puertas s de salida, la capacidad del subsistema es igual a la capacidad de buffers K más el número de puertas de salida s (las puertas de entrada no dejarán entrar ningún camión dentro de las instalaciones si el número de clientes es superior a $p+K+s$) y la disciplina de cola será FIFO.

El modelo final debe equilibrar estos subsistemas de manera que no se generen colas en el exterior del sistema.

Para el cliente lo más importante es el tiempo en cola y el tiempo de servicio propiamente dicho, para la Terminal lo más importante es realizar los servicios²⁵, movimientos de entrega y recepción de containers, con el mínimo coste, es decir utilizando el mínimo de maquinaria y de personal. En este sentido utilizaremos la teoría de la productividad marginal decreciente que dice que a mayor número de máquinas mayor productividad media hasta que llega a su máximo y ésta empieza a decrecer. El óptimo se encuentra cuando la productividad marginal corta a la productividad media.

En resumen la terminal debe optimizar número de puertas, *buffers* y maquinaria además de ofrecer un servicio que cumpla con las expectativas de los clientes a un mínimo coste. En este sentido la estructura ha de estar bien dimensionada y equilibrada de acuerdo con las expectativas de tráfico.

²⁵ Dentro de los límites aceptados por los clientes, normalmente entre 20 y 30 minutos de tiempo de servicio más otro tanto de espera en cola se considera aceptable.

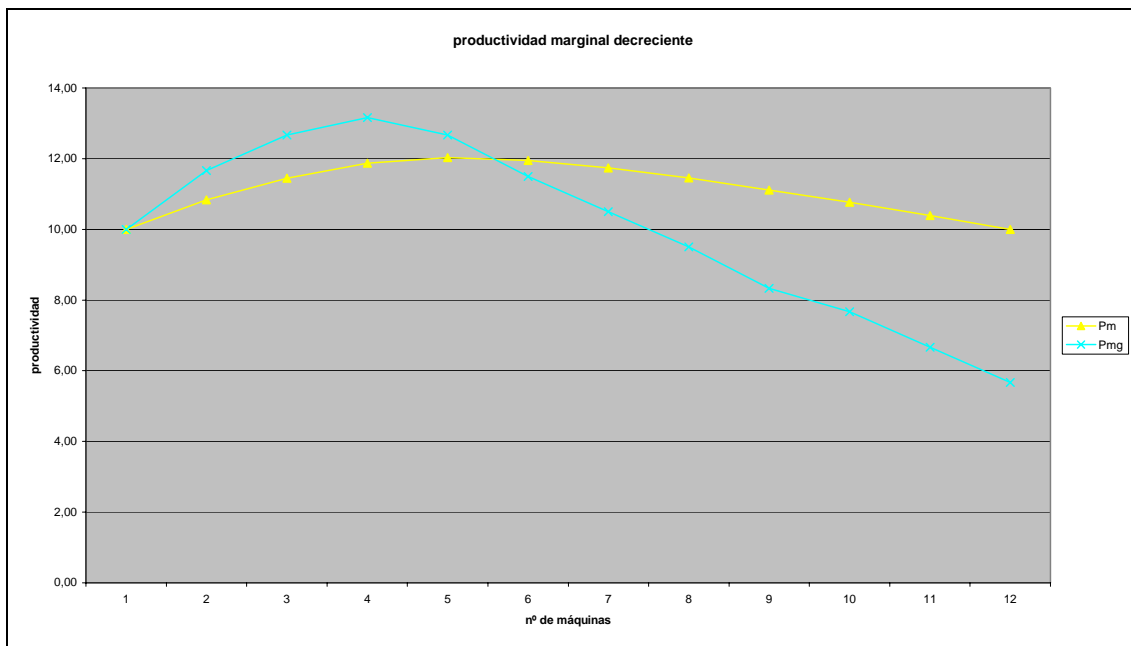


Gráfico 9 Ley de las productividades marginales decrecientes.

4 ESTUDIO DEL RENDIMIENTO

4.1 Introducción

Como ha quedado dicho en el resumen y en la introducción, el objetivo de esta tesis es encontrar el balance óptimo entre los diferentes procesos que integran el sistema operativo de la Terminal, con objeto de encontrar los umbrales de producción y punto de equilibrio.

La intención es dejar abiertas nuevas líneas de investigación que permitan desarrollar trabajos específicos para los diferentes procesos.

En este capítulo estudiaremos las remociones que se generan en la explanada y los rendimientos correspondientes para las diferentes configuraciones. Aunque analizaremos los diferentes *layouts* que puede tener una explanada nos centraremos en la configuración por *calles* operando con *straddlecarriers* (*vancarrier*).

Técnicamente el rendimiento es el cociente relacional entre el *output* y el *input*. Bajo este supuesto los rendimientos en procesos económicos pueden ser mayores que uno pero no así en procesos físicos o de ingeniería donde oscila entre cero y uno. Por ser el Rendimiento R el cociente entre dos valores de una misma magnitud este ha de ser adimensional por definición, siendo su ecuación dimensional,

$$[R] = [X]^{-1} * [X]^1 \quad \text{Ecuación 4-1}$$

Esto significa que la ecuación del rendimiento ha de ser homogénea de grado cero.

En ocasiones olvidamos esta premisa y llamamos rendimiento a otro tipo de funciones que no son adimensionales por ejemplo la velocidad, la aceleración o la productividad de una grúa, que en realidad miden la productividad y no el rendimiento.

Analizaremos el rendimiento en términos de las remociones es decir el coste en movimientos por contenedor producido. Para ello consideramos únicamente el número de movimientos que se generan en los bloques que forman la explanada, prescindiendo de las distancias a bloque, velocidades y tráfico, que no intervienen (número de movimientos) estrictamente en este proceso.

Siendo W_p los movimientos producidos y S las remociones que se han generado, el rendimiento será,

$$R = \frac{W_p}{W_p + S}. \quad \text{Ecuación 4-2}$$

Entonces si por cada contenedor producido solo se ha realizado su propio movimiento, el proceso tendrá rendimiento uno que será el óptimo buscado.

4.2 Aplicación a una explanada de contenedores. Capacidad, Remociones, Distancias y Tráfico

Podemos analizar el rendimiento de la explanada en función de {X} objetivos. Por ejemplo en función de la capacidad efectiva, del número de remociones, de las distancias, del tráfico, *layout* de los bloques, *buffers*, etc., en general podemos decir que los objetivos más significativos son,

$X = \{\text{Capacidad _ efectiva; Remociones; Distancias; Tráfico}\}$

Definamos cada uno de ellos, aunque como hemos dicho anteriormente solo analizaremos el número de remociones por ser el factor principal del rendimiento.

La *Capacidad Efectiva* C_{ef} es a diferencia de la Capacidad Física C_f , una medida dinámica, es decir mide la capacidad durante un periodo de tiempo determinado¹, dicho de otro modo mide la rotación G del inventario.

$C_{ef} = C_f \times G$ **Ecuación 4-3**

Por ejemplo si el flujo diario medio de una Terminal es 345 TEUS y la ocupación física media es de 4140 TEUS, tendremos que cada 12 días ($4140/345=12$) se ha renovado el inventario y que la rotación anual es de 30,4 ($365 / 12$) es decir su Capacidad efectiva es de 125.925 TEUS al año.

Las *Remociones* son el coste en movimientos por contenedor movido, por lo tanto el rendimiento será óptimo cuando el coste sea “uno” es decir que el movimiento de un contenedor no implique más que su propio movimiento y ninguna remoción.

Las *Distancias* de bloque a servidor serán óptimas cuando no generen colas o tiempos de espera en los servidores (grúas, puertas, buffers, etc.,).

El *Tráfico* es determinante en el balance de los procesos, y su ordenación debe de ser considerada en la medida de las posibilidades de sus parámetros e infraestructura.

4.3 Configuración de la explanada, los bloques. Cálculo de las remociones

En primer lugar definiremos las coordenadas de la explanada en función de las distintas configuraciones (*layouts*), y a continuación analizaremos los conceptos de remociones directas e indirectas en base a las siguientes premisas:

¹ Normalmente un año

- Para el cálculo de las remociones consideraremos que el flujo de contenedores de *importación* es aleatorio, al no saber ni el día ni la hora en que el contenedor saldrá de la Terminal aunque sí su estancia media. Esta es la peor de las situaciones posibles si tenemos en cuenta que para los otros flujos (exportación, trasbordos y vacíos) las bahías de contenedores son homogéneas por ser sus contenedores equivalentes, es decir, mismo peso, puerto, tipo, etc., y por consiguiente si la estiba es correcta (disponiendo de espacio) no debería de haber remociones.
- La métrica que utilizaremos será el *container* (estamos hablando de movimientos no de espacios) y no el TEU, en cualquier caso tengamos en cuenta que usualmente no se mezclan contenedores de 20' y 40' por seguridad y eficiencia operativa.
- La configuración del Bloque viene dada por {X} parámetros en función del *layout* y de los requerimientos del tipo de maquinaria.

4.3.1 Definición del Bloque. Premisas operativas

Una explanada de contenedores se divide en BLOQUES. El conjunto elemental de un bloque es la CALLE ó el MÓDULO dependiendo de que el *layout* o configuración de la explanada este diseñado para trabajar con *straddlecarriers*, siendo la calle la unidad de trabajo por donde se mueve la máquina, ó para trabajar con *transtainer*, siendo el módulo la unidad de trabajo por donde se mueve la máquina. En cualquier caso al conjunto elemental también se le llama BAHÍA independientemente del sistema de trabajo (maquinaria y *layout*).

Un bloque es un conjunto de contenedores que se organiza en base a cinco coordenadas:

- Zona: Es la coordenada que divide la explanada en función del tipo de operativa, área, maquinaria, etc., por ejemplo zona de frigoríficos; vacíos, trasbordos, exportación, importación; *vancarrier*, *transtainer*, etc.
- Bloque: Areas de conjuntos elementales.
- Calle: Conjunto elemental o secundario en función de la maquinaria ó *layout*.
- Módulo: Conjunto elemental o secundario en función de la maquinaria ó *layout*
- Altura: Orden de apilamiento desde el suelo.

En el caso de *straddlecarriers* las coordenadas serían Zona, Bloque, Calle, Módulo y Altura, en el caso de *transtainer* Zona, Bloque, Módulo, Calle y Altura.

Operativamente tendremos en cuenta las siguientes premisas:

- Todos los movimientos se realizan en la misma bahía siempre y cuando exista posición libre. Cualquier cambio de bahía implica un tiempo adicional.
- Las remociones buscarán posición priorizando en primer lugar la altura y en segundo lugar la distancia. Es decir que una máquina antes se moverá toda una

calle para colocar un container a uno de alto antes que colocarlo a dos o tres de alto en el módulo contiguo, es cuestión de minimizar el número de remociones.

- Solo en el caso de no disponer de huecos libres el la máquina cambiará de bahía. Aunque existe una penalización en tiempo por desplazarse de bahía no vamos a penalizar este tipo de remociones debido a que en el cómputo total no es significativo al producirse solo inicialmente cuando el bloque está lleno.
- Para cada configuración consideraremos que su estado normal es en pirámide, es decir para una bahía de 332211 (seis pilas con 3, 2 y 1 alturas) consideraremos que su estado real en el espacio es 123321 con estructura piramidal. Más adelante veremos que dadas unas premisas operativas la tendencia es que las máquinas dejen esta estructura² después de manipular las remociones.
- La altura máxima vendrá dada por las características técnicas de la maquinaria, en el caso de trabajar en esta altura se generarán remociones indirectas que se analizarán más adelante.
- Consideraremos las bahías como conjuntos de contenedores sin reposición, es decir no colocaremos contenedores adicionales hasta que ésta se vacíe completamente.
- Asumimos una homogeneidad cronológica en las estibas con objeto de que todos los contenedores tengan las mismas probabilidades de salida, esto es, no mezclaremos contenedores de distintos buques.

4.3.2 Cálculo del número de remociones del conjunto elemental de un bloque. Remociones directas

Llamamos conjunto elemental de un bloque al grupo de contenedores donde todas las unidades están relacionadas entre sí para poder manipularse en la dirección y sentido de trabajo de la máquina. Por ejemplo una *calle* de 21 contenedores dispuestos longitudinalmente en apilamientos de 3 alturas o lo que es lo mismo 7 contenedores por altura estibados a 3 de alto. La calle es el conjunto elemental de los bloques manipulados con *vancarrier* (*straddlecarrier*).

² Esto es lo normal cuando se trabaja con Vancarriers, en el caso de los Transtainers sería en escalera es decir 112233

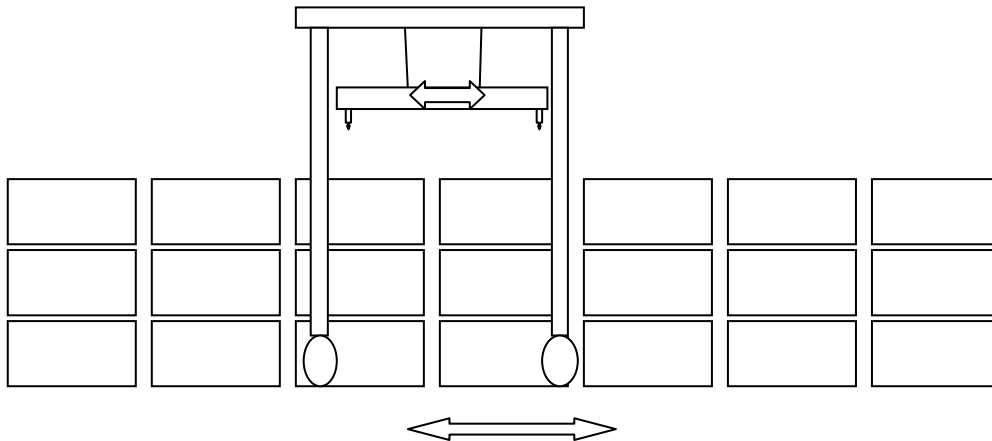


Figura 7 Conjunto de contenedores (bahía) estibados por calle y módulo, manipulados con *Straddlecarrier*

En el caso de bloques manipulados por *transtainer* el conjunto elemental de contenedores es el *módulo*. En este caso las unidades elementales o pilas están dispuestas transversalmente, el módulo estándar es de 6 pilas a 4 de alto (figura 8).

Observemos que en este caso los contenedores son manipulados en un solo sentido, normalmente las plataformas que reciben los contenedores tienen su carril de circulación en uno solo de los extremos, debido a que los *transtainers* tienen un único alerón de entrega/recepción.³

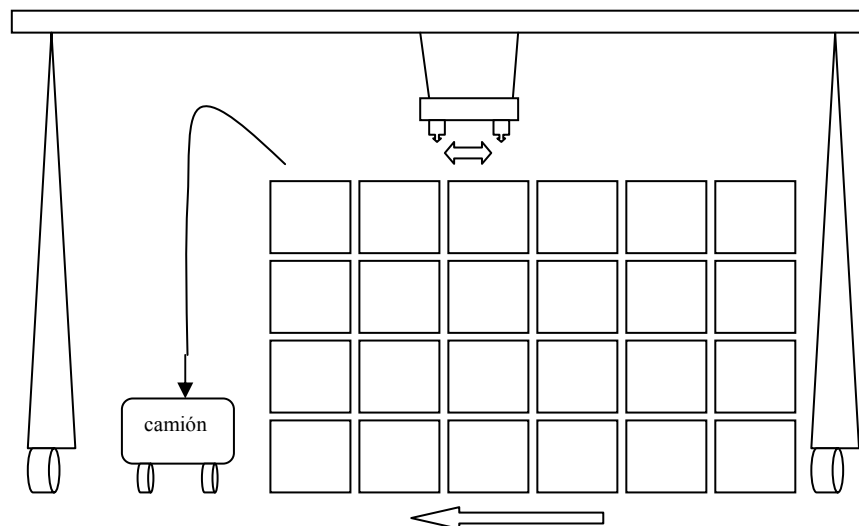


Figura 8 Conjunto de contenedores estibados por módulo y calle, manipulados con *Transtainer*

³ Aunque no es habitual también existen *transtainers* con doble alerón. El alerón es el extremo por donde se opera el camión.

Para analizar tanto las remociones⁴ generadas como el rendimiento de explanada utilizaremos un apilamiento simple por comodidad y sencillez de cálculo ya que éste siempre guarda las mismas proporciones⁵ con r apilamientos.

Siendo S_c , el número de remociones necesarias para mover el contenedor de altura c que tiene $n-c$ contenedores encima y siendo n el apilamiento total, para $n = \{1, 2, 3 \dots n\}$, tendremos que el número de remociones para sacarlo será,

$$s_c = n - c \quad \text{Ecuación 4-4}$$

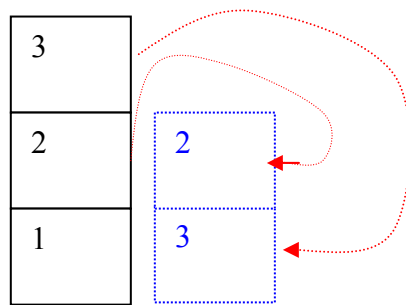


Figura 9 Remociones. Para sacar el (3) se han hecho 2 remociones

entonces, dado que la operación de sacar un contenedor es aleatoria y que la probabilidad p_c de sacar un contenedor de cualquier altura es $1/n$, siendo n la altura, tendremos que el número medio de remociones para sacar un contenedor cualquiera de una pila de altura n es el valor esperado $E[S]$ de la serie generada por la sucesión, $\{s_1, s_2, s_3, s_3, \dots, s_n\}$ o lo que es lo mismo la media de la suma enésima (S_n) de la serie aritmética $\{s_1 + s_2 + s_3 + s_3 + \dots + s_n\}$, teniendo en cuenta que para una altura igual o menor que uno el número de remociones es cero⁶.

Siendo su término general, $s_c = n-c$ y su suma enésima $S_n = \frac{s_1 + s_n}{2}n$ tendremos,

$$E(S) = \sum_{c=1}^n s_c \cdot p_c = \frac{1}{n} \sum_{c=1}^n s_c = \frac{1}{n} (n-1 + \dots + 2 + 1 + 0) = \frac{n-1}{2} \quad \text{Ecuación 4-5}$$

Que es lo mismo que,

⁴ Remociones directas, posteriormente veremos si esto también es cierto para las remociones indirectas.

⁵ Es decir el resultado final de remociones por contenedor o rendimiento por contenedor será proporcional.

⁶ Estamos considerando una sola pila, en consecuencia los únicos valores posibles para n son 0,1,2,3...

$$E(S) = \sum_{x=1}^n g(x)p(x) \quad \text{Ecuación 4-6}$$

Siendo $g(x)=n-x$ (4-4) el número de remociones para una altura x , considerando x discreta, $E(S)$ su valor esperado y $p(x)$ la función de probabilidad,

$$p(x) = \begin{cases} \frac{1}{n} \rightarrow x = \{1,2,\dots,n\} \\ 0 \rightarrow x = 0 \end{cases} \quad \text{Ecuación 4-7}$$

entonces,

$$E(S) = \frac{1}{n} \sum_{x=1}^n (n-x) \quad \text{Ecuación 4-8}$$

que es lo mismo que (4-5).

Igualmente si consideramos que X es el índice de explanada y por lo tanto lo tratamos como una variable continua tendremos que el valor esperado de remociones $E(S)$ es el primer momento alrededor del cero,

$$E(S) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)g(x)dx \quad \text{Ecuación 4-9}$$

Siendo $g(x)$ la función para la cual queremos saber su valor esperado $E(S)$ y $f(x)$ su función de densidad de probabilidad,

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{n-1} \rightarrow 1 \leq \forall x \leq n \\ 0 \rightarrow \forall x < 1 \end{cases} \quad \text{Ecuación 4-10}$$

sabiendo que $g(x) = n-x$ es el número de remociones para una altura determinada, es decir (4-4), para un intervalo entre 1 y n considerando que para cualquier altura menor o igual a uno el número de remociones es cero, tendremos,

$$E(S) = \frac{1}{n-1} \int_1^n (n-x) dx =$$

$$= \frac{1}{n-1} \frac{n^2 - 2n + 1}{2} =$$

Ecuación 4-11

$$= \frac{(n-1)^2}{2(n-1)} = \frac{n-1}{2}$$

Coincidiendo con las ecuaciones (4-5) y (4-8) es decir que coinciden los resultados independientemente del método utilizado. Resumiendo que $E(S)$ es el valor esperado de remociones para sacar un contenedor cualquiera con un índice de altura n , y que s_c son las remociones necesarias para sacar un contenedor concreto de altura c (tiene $n-c$ contenedores encima).

4.3.3 Cálculo de las remociones en un bloque teniendo en cuenta la altura operativa de la máquina. Remociones indirectas que se generan

Entendemos por remociones indirectas el conjunto de movimientos que son necesarios para sacar un contenedor estando fuera de su apilamiento pero en el mismo conjunto elemental o bahía.

En este apartado consideramos una estructura cerrada, es decir sin huecos. Para r número de pilas, altura media n , altura máxima N y p el paso⁷ de la máquina, siendo $p \geq N$. Consideraremos primero las remociones directas y las indirectas para un número impar de pilas, posteriormente haremos el mismo análisis para un número par, hallando finalmente una expresión general utilizable en ambos casos.

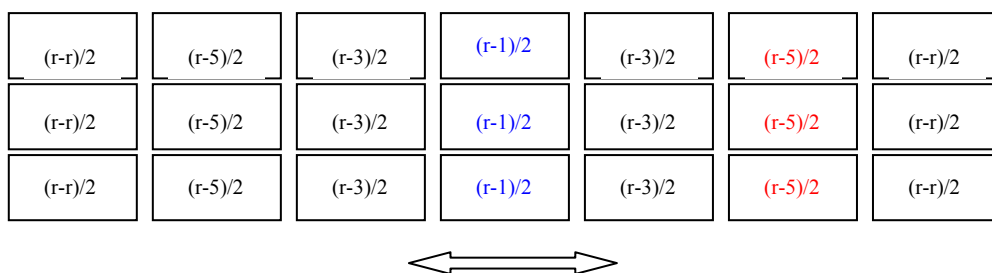


Figura 10 Remociones indirectas que se generan en función del número de pilas en una bahía impar (para $r=7$, $N=3$ y $p=(2+1)$)

⁷ Para $p=N$ la máquina trabaja sin remociones indirectas hasta una altura $p-1$ siendo p el espacio (altura) de paso.

Observando la figura anterior tenemos que a partir de una altura superior a la de trabajo ($p-1$) se generan remociones indirectas, la altura p la utiliza la máquina para circular en carga (con un contenedor bajo *spreader*). Observemos que las remociones indirectas generadas son las mismas para toda la pila.

Por ejemplo para sacar cualquier contenedor de la pila central (en azul) tenemos que remocionar los tres contenedores que tiene por delante o los tres que tiene por detrás, dependiendo de por donde entre el *vancarrier*. Para sacar cualquier contenedor de la segunda pila (en rojo) tendría que remocionar la tercera altura de la primera pila. En ambos casos observamos que el número de remociones indirectas necesarias son 3 y 1 respectivamente que coincide con las expresiones de cada pila en la figura 10, teniendo en cuenta que r es el número de pilas de la bahía siendo 7 en este caso.

La suma de las remociones indirectas (para un número de pilas impar) generadas en el último manto es,

$$I' = \left(\frac{r-1}{2} + 2\frac{r-3}{2} + \dots + 2\frac{r-r}{2} \right),$$

multiplicando por el número de mantos n y dividiendo por el número de contenedores en la bahía ($n \times r$) nos da el número esperado de remociones indirectas en la bahía, siendo n el índice de altura de la bahía y r su número de pilas.

$$I_i = \left(\frac{r-1}{2} + 2\frac{r-3}{2} + \dots + 2\frac{r-r}{2} \right) \frac{n}{nr}$$

Hallando la suma de la parte entre paréntesis del segundo término,

$$I_i = (S1 + S2) \frac{n}{nr}$$

$$S1 = \frac{r-1}{2}$$

$$S2 = \frac{2\frac{r-3}{2} + 2\frac{r-r}{2}}{2} \frac{r-1}{2} = \frac{(r-3)(r-1)}{4} = \frac{(r-1)^2}{4} - \frac{r-1}{2},$$

donde multiplicamos la semisuma del segundo y r -ésimo términos por $(r-1)/2$ que es el número de términos de la subserie $S2$ entonces,

$$Ii = \left(\frac{r-1}{2} + \frac{(r-1)^2}{4} - \frac{r-1}{2} \right) \frac{1}{r} = \left(\frac{(r-1)^2}{4} \right) \frac{1}{r}$$

desarrollando el binomio al cuadrado,

$$Ii = \frac{r-2}{4} + \frac{1}{4r}$$

sumando las remociones directas tendremos que para un apilamiento impar las remociones totales esperadas serán,

$$Sm_1 = \frac{n-1}{2} + \frac{r-2}{4} + \frac{1}{4r} \quad \text{Ecuación 4-12}$$

esta es la expresión que nos da el número esperado de remociones totales, directas más indirectas en una bahía con apilamiento impar, para sacar el próximo contenedor de la bahía.

Hagamos el mismo análisis para un apilamiento par, si observamos la figura 11 tenemos que los términos de la serie correspondiente a las remociones indirectas son simétricos con respecto al centro longitudinal de la calle y que por lo tanto su cálculo también es distinto como se ve en la figura.

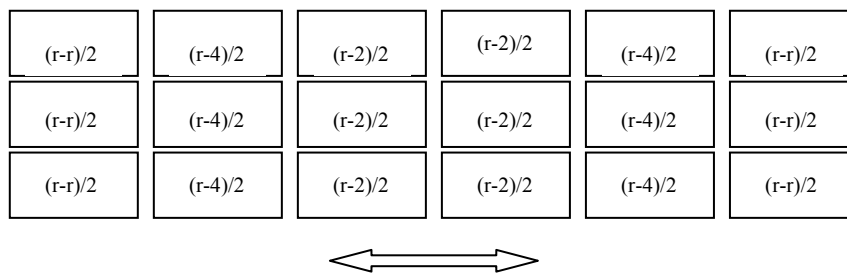


Figura 11 Remociones indirectas que se generan en función del número de pilas en una bahía par (para r=6 y n=3)

La suma de las remociones indirectas generadas en el último manto es,

$$I' = \left(\frac{r-2}{2} + \frac{r-4}{2} + \dots + \frac{r-r}{2} \right) 2$$

operando igual que antes llegamos a la expresión que nos da el número total de remociones directas más indirectas,

$$Sm_p = \frac{n-1}{2} + 2 \left(\frac{r-2}{2} + \frac{r-4}{2} + \dots + \frac{r-r}{2} \right) \frac{n}{nr}$$

hallando la suma de la parte entre paréntesis del segundo término, es decir el total de remociones indirectas, siendo $r/2$ el número de términos de la serie tendremos,

$$I' = 2 \left(\frac{\frac{r-2}{2} + \frac{r-r}{2}}{2} \right) \frac{r}{2}$$

$$= \left(\frac{r-2}{2} \right) \frac{r}{2} = \frac{r^2 - 2r}{4}$$

procediendo como en el caso de un número impar de pilas, el número esperado total de remociones en la bahía será,

$$Sm_p = \frac{n-1}{2} + \left(\frac{r(r-2)}{4} \right) \frac{n}{nr}$$

de donde,

$$Sm_p = \frac{n-1}{2} + \frac{r-2}{4}$$

esta es la expresión que nos da el número esperado de remociones totales, directas más indirectas para una bahía con un apilamiento par, para sacar el próximo contenedor de la bahía.

Podemos buscar una función tal que,

$$f(r) = \begin{cases} 1 \rightarrow \forall r \text{ impar} \\ 0 \rightarrow \forall r \text{ par} \end{cases}$$

entonces tendremos,

$$S_m = \frac{n-1}{2} + \frac{r-2}{4} + \frac{1}{4r} f(r)$$

siendo $f(r) = \frac{1}{2}(1 - (-1)^r)$ **Ecuación 4-13**

$$S_m = \frac{n-1}{2} + \frac{r-2}{4} + \frac{(1 - (-1)^r)}{8r}$$

ésta es la expresión que nos da el número esperado de remociones totales, directas más indirectas independientemente de que el apilamiento sea par o impar. Esto es, el número de remociones esperadas al ir a buscar de forma aleatoria el próximo contenedor, dada una operativa de *Straddlecarrier* (calle).

Usaríamos el mismo razonamiento para analizar y calcular las remociones en una operativa de *Transtainer*, solo que sería algo más sencillo al tener salida por uno solo de los lados. En cualquier caso, a partir de aquí focalizaremos el análisis solamente sobre operativa de *calles*.

Una vez conocidas las remociones el análisis de rendimiento, capacidad o costes es generalizable a cualquier otra operativa.

4.3.4 Modelo heurístico para el cálculo del número de remociones esperado para el próximo movimiento teniendo en cuenta las diferentes configuraciones para un índice de altura dado

En el apartado anterior se han calculado las remociones esperadas para el próximo movimiento teniendo en cuenta una configuración cerrada es decir sin huecos. En este apartado queremos encontrar un modelo empírico que nos dé el número esperado de remociones (para el próximo movimiento) dado un índice de altura cualquiera, esto es, teniendo en cuenta las diferentes configuraciones que puede tener cada índice de altura en función de la posición de los huecos libres y los containers.

Para ello tendremos en cuenta no solo el índice (n), número de pilas (r), índice de altura máximo (N) y la altura de paso de máquina (p), sino que también tendremos en cuenta el número de huecos (h) para una altura máxima (N), y su posición relativa o lo que es lo mismo el grado de cierre⁸ k .

Como vemos en las tablas 5, 6 y anexos C y D, sería muy laborioso tabular los datos hallados experimentalmente, es decir las remociones halladas de forma estrictamente

⁸ El cierre de una bahía depende de la posición de los huecos y del número de contenedores que tengan paso libre de máquina sin necesidad de remociones indirectas. Es decir es el opuesto del grado de accesibilidad.

empírica correspondientes a cada índice de altura⁹, en consecuencia recurrimos a un modelo heurístico basado en el cálculo de las probabilidades de transición de cada configuración.

Una vez tengamos el modelo “empírico” buscaremos una aproximación mediante un modelo analítico, que se le aproxime, menos laborioso y más rápido para hallar las remociones esperadas para el próximo movimiento. Por último buscaremos otro modelo que nos dé el total de remociones necesarias para vaciar completamente la bahía.

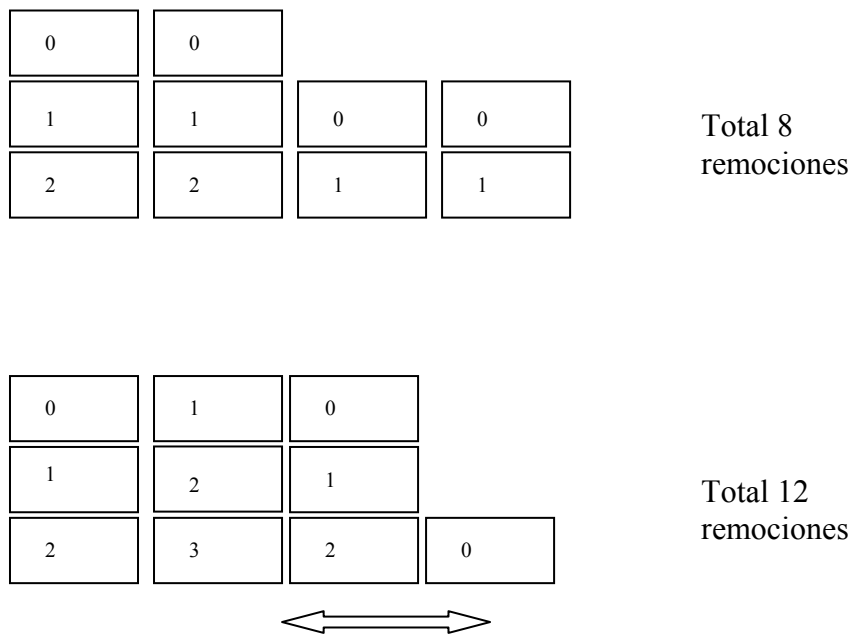


Figura 12 Para $n=2,5$ siendo $p=3$ y $r=4$, son posibles estas dos configuraciones

Si observamos la figura 12 cada una de las dos configuraciones posibles para un índice de altura 2,5 tiene las siguientes distribuciones de contenedores por pila, (3322) y (3331), siendo respectivamente $P^{(2,2,0,0)}(4) = 6$ y $P^{(3,0,1,0)}(4) = 4$ las permutaciones con repetición de cuatro pilas con 3,2,1,0 containers (siendo en total 10 containers sobre cuatro pilas), donde en el primer caso los superíndices indican que el “3” y el “2” se repiten 2 veces sobre cuatro posiciones y en el segundo que el “3” y el “1” se repiten 3 y 1 respectivamente.

Esto significa 4 y 6 estados posibles respectivamente (ver tabla 6 para todas las configuraciones) para cada configuración (3322 y 3331), en consecuencia para un índice de altura igual a 2,5 tenemos 10 estados posibles teniendo cada uno una probabilidad distinta como veremos más adelante.

⁹ Para una bahía 3x3 tenemos 20 configuraciones posibles. Para bahías de 3x4, 3x5, 3x6 y 3x7 tendremos 35, 56, 84 y 120 respectivamente.

Siguiendo con la figura 12 los números que hay en cada posición indican las remociones (directas más indirectas) necesarias para sacar el contenedor que la ocupa. En este caso para la configuración (3322) tenemos un total de 8 remociones y para la (3331) 12 remociones. Esto significa que para un mismo índice de altura varían las remociones en función de la configuración y como veremos a continuación también del estado.

En la figura 13 observamos que para la configuración (3331) existen 4 permutaciones o estados, aunque consideramos solo dos al ser equivalentes (en cuanto al número de remociones) dos a dos, (3331) es equivalente a (1333) y (3313) es equivalente a (3133). En la misma figura podemos comprobar que para cada estado existe un número distinto de remociones.

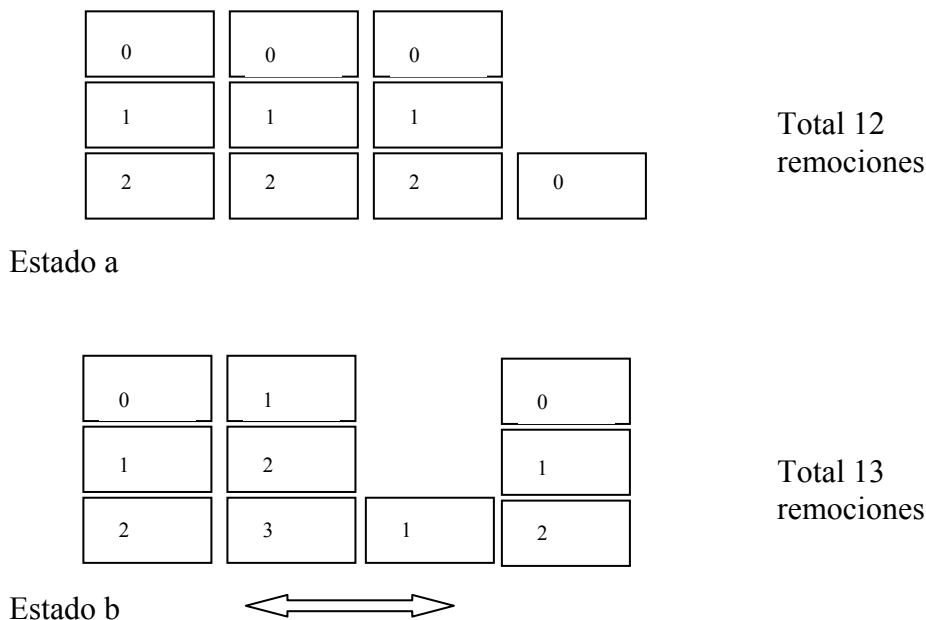


Figura 13 Para la misma configuración (3331) el número de remociones varía en función del estado

En consecuencia a pesar de tener la misma configuración (3331), el número de remociones puede variar en función del estado, aunque también dos estados aún siendo de diferentes configuraciones e incluso de diferentes índices pueden tener el mismo número de remociones y por lo tanto ser equivalentes. Todavía existe una complicación más, las probabilidades de cada configuración no son iguales, por ejemplo para una bahía de 3x3 (alturas por pilas) cuando el índice es 2 (6 contenedores) las configuraciones posibles son, (330), (321) y (222) siendo la probabilidad (ver tabla 7) de cada una de ellas (0.350), (0.600) y (0.050) respectivamente. Por supuesto que para cada uno de los estados de cada configuración también varían las probabilidades.

En general, podemos deducir el número total de configuraciones y estados fácilmente mediante la aplicación de las fórmulas de Combinatoria elemental. Entonces el total de

configuraciones posibles, para todos los índices de altura que se pueden dar después de correr (w) pasos o transiciones (es decir vaciando todos los containers), en una bahía de dimensión ($N \times r$), es el número de combinaciones con repetición (C') para m ($0, 1, 2, \dots, N$) elementos tomados de r en r .

$$C'_{m,r} = \frac{(m+r-1)!}{r!(m-1)!}$$

pero como que el número de elementos es $\{0, 1, 2, \dots, N\}$ es decir :

$$m = N + 1$$

$$C'_{m,r} = \frac{(N+r)!}{r!N!}$$

Igualmente, de la misma manera que para cada índice existen una o varias configuraciones, para cada una de éstas existen uno o varios estados siendo el total de estados posibles igual a las variaciones con repetición (V') de la bahía después de correr todos sus pasos (ver tablas 5 y 6) hasta quedar vacía.

$$V'_{m,r} = m^r$$

igual que antes, $m = N + 1$

$$V'_{m,r} = (N+1)^r$$

En especial el número de estados posibles para una configuración concreta viene dado por las permutaciones con repetición (P') de la misma.

$$P'^{\alpha,\beta,\gamma,\delta}_r = \frac{r!}{\alpha!\beta!\gamma!\delta!}$$

siendo $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ la repetición de cada índice de pila (3,2,1,0).

Autores como Kim¹⁰(1997) y McDowell's¹¹(1985) para simplificar la evaluación del proceso asumen que los diferentes estados de una configuración son equivalentes. Bien, en realidad como hemos visto no todos son equivalentes pero podemos asumir que las diferencias no son significativas. Además existen estados que en realidad *no son posibles*, por ejemplo 3323 no puede ocurrir para máquinas que trabajan a (2+1) donde 2 es la altura de trabajo y 3 la de paso, es imposible sacar la tercera altura de la tercera pila y pasar por encima de la tercera altura de la cuarta pila ya que para ello necesitaríamos una máquina de (3+1). Por último también tenemos estados equivalentes dentro de una misma configuración como hemos visto antes, por ejemplo 3331 y 1333.

En consecuencia consideraremos únicamente las diferentes configuraciones para cada índice de altura, nombrando las pilas por su altura de mayor a menor.

En las tablas siguientes analizamos todas las configuraciones y estados posibles para los diferentes niveles de ocupación de las bahías de dimensiones (3x3) y (3x4), es decir después de correr todos los pasos desde un máximo de ocupación hasta quedar completamente vacía.

¹⁰ Kim, K.H. Evaluation of the number of rehandles in container yards. Computers and Industrial Engineering, 1997, 32 (4), 701–711.

¹¹ McDowell, E., Martin, G., Cho, D. and West, T., A study of maritime container handling, Oregon State University ,Sea Grant College Program, Ads, Corvallis, Oregon 97331, 402, 1985, 1 10.

Índice	Uds	CFG		Estados	Estados Independientes
3,00	9	1	333	1	1
2,67	8	1	332	3	2
2,33	7	2	331 322	6	2
2,00	6	3	330 321 222	10	3
1,67	5	3	320 311 221	12	3
1,33	4	3	310 220 211	12	3
1,00	3	3	300 210 111	10	3
0,67	2	2	200 110	6	2
0,33	1	1	100	3	1
0,00	0	1	000	1	1
		20		64	21

Tabla 5 Dimensión (3x3) 3 alturas por 3 pilas. Configuraciones y Estados

Índice	Uds	CFG		Estados	Estados Independientes
3.00	12	1	3333	1	1
2.75	11	1	3332	4	2
2.50	10	2	3331+3322	10	5
2.25	9	3	3330+3321+3222	20	6
2.00	8	4	3320+3311+3221+2222	31	7
1.75	7	4	3310+3220+3211+2221	40	5
1.50	6	5	3300+3210+2211+2220+3111	44	5
1.25	5	4	3200+3110+2210+2111	40	4
1.00	4	4	3100+2200+2110+1111	31	4
0.75	3	3	3000+2100+1110	20	3
0.50	2	2	2000+1100	10	2
0.25	1	1	1000	4	1
0.00	0	1	0000	1	1
		35		256	46

Tabla 6 Dimensión (3x4) 3 alturas por 4 pilas. Configuraciones y Estados.

Donde sencillamente hemos aplicado las formulas anteriores de (C') , (V') y (P') para determinar el total de configuraciones, estados y estados parciales (5ª columna) respectivamente. En la sexta columna se indica el número de grupos de estados independientes para cada índice de altura, por ejemplo 1333 y 3331 son dos estados diferentes de la misma configuración 3331 con 9 remociones en ambos casos y por lo tanto equivalentes.

En las dos tablas siguientes se hace un cálculo de las remociones para cada índice de altura teniendo en cuenta las diferentes probabilidades para cada configuración. La primera columna muestra los índices de altura, la segunda el número de contenedores en la bahía, la tercera la configuración, la cuarta la probabilidad para dicha configuración, la quinta es la suma de remociones necesarias para mover cada uno de los contenedores (no para vaciarla), la sexta el número esperado de remociones para esa configuración y

por último, la séptima el número esperado de remociones para cada índice al efectuar el próximo movimiento teniendo en cuenta las probabilidades de cada configuración .

N	C	Cfg	Pb	RS	RS'	RS''
3,00	9	333	1,000	12	1,33	1,33
2,67	8	332	1,000	7	0,88	0,88
2,33	7	331	0,500	6	0,86	0,79
		322	0,500	5	0,71	
2,00	6	330	0,350	6	1,00	0,78
		321	0,600	4	0,67	
		222	0,050	3	0,50	
1,67	5	320	0,725	4	0,80	0,72
		311	0,142	3	0,60	
		221	0,132	2	0,40	
1,33	4	310	0,494	3	0,75	0,57
		220	0,309	2	0,50	
		211	0,198	1	0,25	
1,00	3	300	0,194	3	1,00	0,41
		210	0,647	1	0,33	
		111	0,159	0	0,00	
0,67	2	200	0,280	1	0,50	0,14
		110	0,720	0	0,00	
0,33	1	100	1,000	0	0,00	0,00
0,00	0	000	1,000	0	0,00	0,00
		20	10,00	63	11,08	5,61

Tabla 7 Dimensión 3x3 tabla de Probabilidades de transición

ESTUDIO DEL RENDIMIENTO

N	C	Cfg	Pb	RS	RS'	RS''
3,00	12	3333	1,000	18	1,50	1,50
2,75	11	3332	1,000	13	1,18	1,18
2,50	10	3331	0,429	12	1,20	
		3322	0,571	8	0,80	0,97
2,25	9	3330	0,276	12	1,33	
		3321	0,517	7	0,78	
		3222	0,207	6	0,67	0,91
2,00	8	3320	0,528	7	0,88	
		3311	0,086	6	0,75	
		3221	0,371	5	0,63	
		2222	0,015	4	0,50	0,77
1,75	7	3310	0,169	6	0,86	
		3220	0,574	5	0,71	
		3211	0,187	4	0,57	
		2221	0,070	3	0,43	0,69
1,50	6	3300	0,112	6	1,00	
		3210	0,526	4	0,67	
		3111	0,041	3	0,50	
		2220	0,187	3	0,50	
		2211	0,134	2	0,00	0,58
1,25	5	3200	0,381	4	0,80	
		3110	0,120	3	0,60	
		2210	0,378	2	0,40	
		2111	0,120	1	0,20	0,55
1,00	4	3100	0,201	3	0,75	
		2200	0,152	2	0,50	
		2110	0,599	1	0,25	
		1111	0,048	0	0,00	0,38
0,75	3	3000	0,050	3	1,00	
		2100	0,502	1	0,33	
		1110	0,448	0	0,00	0,22
0,50	2	2000	0,184	1	0,50	
		1100	0,816	0	0,00	0,09
0,25	1	1000	1,000	0	0,00	0,00
0,00	1	0000	1,000	0	0,00	0,00
		35	13,00	155	20,78	7,83

Tabla 8 Dimensión 3x4 tabla de Probabilidades Estacionarias y Remociones

Para el cálculo de probabilidades (Kim 1998), calculó lo que llamaba las probabilidades de estado de forma recursiva, multiplicando las probabilidades de cambio de la configuración (i) con (c) contenedores a la (j) con ($c-1$), que llamaba $P_c(i,j)$, por la probabilidad de la configuración de origen (S_{ci}), teniendo en cuenta una altura máxima de $p-1$ es decir la altura de paso de máquina menos uno con lo cual eliminaba las posibles remociones indirectas y simplificaba notablemente el cálculo.

En esta tesis tendremos en cuenta las remociones indirectas al trabajar al límite de la altura permitida por la máquina (p), que es lo que ocurre en la realidad, para ello diseñaremos un modelo “empírico” del proceso para posteriormente ajustar una fórmula aproximada que nos facilite los resultados de una forma menos laboriosa. Además para cada configuración hallaremos una probabilidad de estado que calcularemos también de forma recursiva pero mediante un cálculo basado en la suma de momentos del número de pasos de salida de cada configuración origen, el momento total de cada configuración y el momento total del índice de altura (ver Anexos C y D).

Las probabilidades de estado de cada configuración se calculan en base a tres pasos:

1. Suma (M_j) de los momentos parciales (m_{ij}) de los pasos de salida (p_{ij}) de cada configuración de origen(i) a la de llegada(j) por la probabilidad de la configuración de origen S_i
2. Momento total ($\sum M_j$) del índice, que es la suma de los momentos de las diferentes configuraciones (J) que componen cada índice
3. La probabilidad de estado es la relación entre el momento (M_j) de la configuración y el momento total ($\sum M_j$) del índice

$$S_j = \frac{\sum_1^I p_{ij} \cdot S_i}{\sum_1^J M_j} = \frac{\sum_1^I m_{ij}}{\sum_1^J M_j} = \frac{M_j}{\sum_1^J M_j} \quad \text{Ecuación 4-14}$$

Para realizar el cálculo de las remociones esperadas de una bahía con un índice determinado ponderamos las remociones en base a la probabilidad de cada configuración, siendo las probabilidades totales de cada índice la suma de las de cada configuración e igual a uno como es lógico.

Por ejemplo en la Tabla 8 tenemos que para un índice igual a 1 las configuraciones (3100, 2200, 2110 y 1111) tienen respectivamente (0,201; 0,152; 0,599 y 0,048) probabilidades siendo el total igual a 1 como era de esperar.

Por último se multiplican las probabilidades por el total de remociones de cada configuración y se divide su sumatorio por el total de containers. En el caso anterior con índice igual a 1, las remociones totales correspondientes a cada configuración son (3, 2, 1, 0) que haciendo el sumatorio de todas ellas multiplicadas por sus probabilidades de estado correspondientes y dividido por el total de contenedores (4) nos dará el número esperado de remociones para un índice igual a 1 siendo igual a 0,38 remociones por container movido. En las tablas 7 y 8 podemos ver los resultados para los diferentes

índices de las bahías de dimensión (3x3) y (3x4). Para más detalle de los cálculos ver anexos C y D.

Según lo dicho anteriormente para calcular el número esperado de remociones de un índice determinado utilizaremos la siguiente fórmula,

$$R_n = \frac{\sum^J S_j \cdot R_j}{C_n} \quad \text{Ecuación 4-15}$$

siendo S_j las probabilidades de cada configuración, R_j las remociones totales sin ponderar para la misma, R_n las remociones totales correspondientes al índice (n) y C_n el número de containers. Llamando J al total de configuraciones para el índice dado.

En los anexos C y D se muestran las probabilidades de transición para varias dimensiones 3x3, 3x4, 3x5, etc. En estas tablas se calculan los momentos parciales de cada configuración, los momentos totales de cada índice y las remociones correspondientes para cada configuración e índice.

Veámoslo con más detalle, en la siguiente figura tenemos las remociones necesarias para sacar cada container y entre paréntesis un número que indica la referencia del mismo.

0(3)	1(6)	1(9)	0(12)	Total 18 remociones
1(2)	2(5)	2(8)	1(11)	
2(1)	3(4)	3(7)	2(10)	

Figura 14 Configuración (3333) índice 3

Calculemos primero las remociones correspondientes para **12** containers y un índice igual a **3**, para el cual la única configuración posible es (3333) siendo 1 su probabilidad (al ser la única para un índice 3) y 18 el total de remociones, entonces el número esperado de remociones será $18 \times 1/12 = 1,50$ aplicando la ecuación 4-18 y como podemos comprobar en la Tabla 8 y Anexos C y D.

Para conocer las remociones esperadas para los siguientes índices calculamos todas las transiciones posibles de la configuración (3333) con índice 3 a las siguientes con 11, 10, etc., containers. Sacando cualquiera de los containers habrá un cambio de configuración y de estado. Veamos una a una todas las transiciones posibles:

- Contenedor número 1 → 0333
- Contenedor número 2 → 1333
- Contenedor número 3 → 2333
- Contenedor número 4 → 2033
- Contenedor número 5 → 2133
- Contenedor número 6 → 2233

- Contenedor número 7 → 3302
- Contenedor número 8 → 3312
- Contenedor número 9 → 3322
- Contenedor número 10 → 3330
- Contenedor número 11 → 3331
- Contenedor número 12 → 3332

Al sacar un container de la configuración (3333) de forma aleatoria, se han generado configuraciones con 11, 10, 9 y 8 containers, aunque lo lógico hubiese sido que quedasen 11, esto es debido a que inicialmente se tienen que remocionar containers fuera de la bahía por falta de espacio, en definitiva queda la siguiente distribución,

- Con 11 → 3332 x 2
- Con 10 → 3331 x 2 + 3322 x 2
- Con 9 → 3330 x 2 + 3321 x 2
- Con 8 → 3320 x 2

Ahora podemos calcular las remociones (según ecuación 4-18) correspondientes a un índice igual a **2,75** para el cual la única configuración posible es (3332), siendo por lo tanto 1 su probabilidad, 13 el total de remociones y **11** el número de containers. Entonces el número esperado será $13 \times 1 / 11 = 1,18$.

0(3)	1(6)	0(9)	
1(2)	2(5)	1(8)	0(11)
2(1)	3(4)	2(7)	1(10)

Total 13
remociones

Figura 15 Configuración (3332) índice 2,75

Para un índice **2,50** correspondiente a **10** containers, analizamos en primer lugar las transiciones desde la configuración de origen (**3332**) que es la única para 11 containers, teniendo las siguientes probabilidades de paso según vemos en la figura 3-9:

- Contenedor número 1 → 0332
- Contenedor número 2 → 1332
- Contenedor número 3 → 2332
- Contenedor número 4 → 2032
- Contenedor número 5 → 2132
- Contenedor número 6 → 2232
- Contenedor número 7 → 3302
- Contenedor número 8 → 3312
- Contenedor número 9 → 3322
- Contenedor número 10 → 3330
- Contenedor número 11 → 3331

Al sacar un container de la configuración (3332) de forma aleatoria, se han generado configuraciones con 10, 9, 8 y 7 containers con la siguiente distribución,

- Con 10 → 3331 x 1 + 3322 x 2
- Con 9 → 3330 x 1 + 3321 x 2 + 3222 x 1
- Con 8 → 3320 x 2 + 3221 x 1
- Con 7 → 3220 x 1

Para el siguiente caso al existir dos configuraciones posibles necesitamos conocer la probabilidad de cada una de ellas, a diferencia de los índices 3 y 2,75 en que solo había una configuración y por lo tanto su probabilidad era uno.

Para el cálculo de probabilidades de cada una de las configuraciones (3331) y (3322) correspondientes a 10 containers, índice (2,5), tendremos en cuenta que de (3333) han habido 2 transiciones a (3331) y 2 a (3322) de igual modo de (3332) ha habido 1 y 2 transiciones respectivamente, lo que supone un total de 7 transiciones o pasos.

Utilizando la fórmula 4-17 tendremos,

$$S_{10} = \frac{\sum_1^i p_{ij} \cdot S_i}{\sum_1^J M_j}$$

en este caso la suma de momentos parciales "S₁₀" es 7 entonces,

$$S_{10(3331)} = \frac{(1 \times 2)(3333) + (1 \times 1)(3332)}{7} = 0,429$$

$$S_{10(3322)} = \frac{(1 \times 2)(3333) + (1 \times 2)(3332)}{7} = 0,571$$

Donde para cada configuración hemos hecho el sumatorio del producto del número de transiciones o pasos recibidos por la probabilidad de su origen y dividido por el momento total de todas las configuraciones (3331 y 3322) que es 7 como vemos si sumamos los numeradores de las dos expresiones anteriores.

Procedemos igual que con 12 y 11 containers y calculamos las remociones correspondientes a un índice igual a 2,50 (10 containers), con las configuraciones (3331 y 3322) siendo sus probabilidades (0,429 y 0,571) y (12 y 8) las remociones correspondientes, entonces según la ecuación 4-18 el número esperado será (12 x 0,429 + 8 x 0,571)/10 = 0,97.

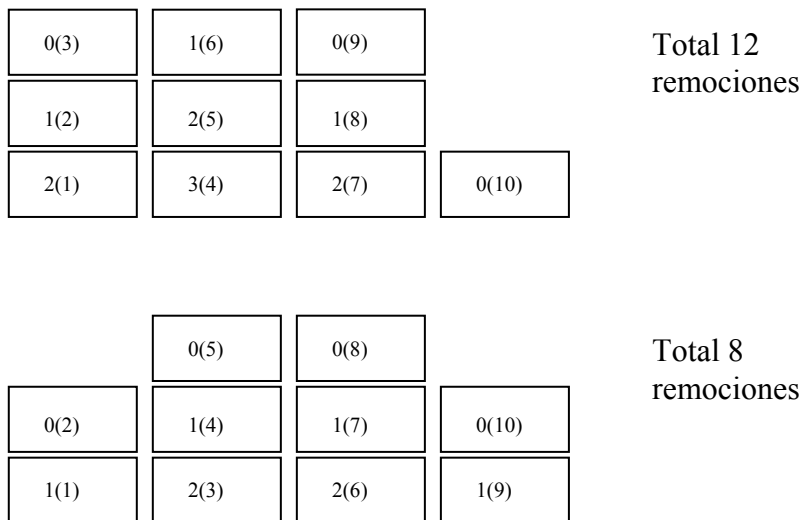


Figura 16 Configuraciones (3331, 3322) índice 2,50

Pasamos a analizar el siguiente índice (2,25) correspondiente a 9 containers, para ello y según Figura 16, comprobamos las transiciones de (3331 y 3322) para 10 containers. Analizamos en primer lugar las siguientes transiciones desde (3331):

- Contenedor número 1 → 0331
- Contenedor número 2 → 1331
- Contenedor número 3 → 2331
- Contenedor número 4 → 3022
- Contenedor número 5 → 3122
- Contenedor número 6 → 3222
- Contenedor número 7 → 3302
- Contenedor número 8 → 3312
- Contenedor número 9 → 3321
- Contenedor número 10 → 3330

Con las siguientes distribuciones para (3331)

- Con 9 → 3330 x 1 + 3321 x 3 + 3222 x 1
- Con 8 → 3320 x 1 + 3311 x 1 + 3221 x 1
- Con 7 → 3310 x 1 + 3220 x 1

Continuamos con las transiciones de (3322), a partir de ahora ordenaremos las pilas de mayor a menor para facilitar la clasificación de las configuraciones resultantes, ya que como hemos dicho antes ambos estados (de la misma configuración) son equivalentes en cuanto al número de remociones:

- Contenedor número 1 → 3320
- Contenedor número 2 → 3321
- Contenedor número 3 → 3220
- Contenedor número 4 → 3221
- Contenedor número 5 → 3222
- Contenedor número 6 → 3220
- Contenedor número 7 → 3221
- Contenedor número 8 → 3222
- Contenedor número 9 → 3320
- Contenedor número 10 → 3321

Con las siguientes distribuciones para (3322)

- Con 9 \rightarrow 3321 x 2 + 3222 x 2
- Con 8 \rightarrow 3320 x 2 + 3221 x 2
- Con 7 \rightarrow 3220 x 2

Ahora podemos calcular sus probabilidades. Para este índice existen tres configuraciones posibles (3330, 3321 y 3222) sus probabilidades serán en base a 4 pasos desde (3333) más 4 desde (3332) más 9 desde (3331 y 3322) siendo un total de 17 transiciones o pasos. Entonces sus probabilidades serán,

$$S_{9(3330)} = \frac{(1 \times 2)(3333) + (1 \times 1)(3332) + (0,429 \times 1)(3331)}{12,43} = 0,276$$

$$S_{9(3321)} = \frac{(1 \times 2)(3333) + (1 \times 2)(3332) + (0,429 \times 3)(3331) + (0,571 \times 2)(3322)}{12,43} = 0,517$$

$$S_{9(3222)} = \frac{(1 \times 1)(3332) + (0,429 \times 1)(3331) + (0,571 \times 2)(3322)}{12,43} = 0,207$$

Como antes el denominador es igual a la suma de los momentos parciales de las tres configuraciones, esto es la suma de los tres numeradores.

Siguiendo el mismo procedimiento, calculamos las remociones correspondientes a un índice igual a 2,25 (9 containers), con las siguientes configuraciones posibles (3330, 3321 y 3222) siendo sus probabilidades (0,276; 0,517 y 0,207) y (12, 7 y 6) las remociones correspondientes, aplicando la ecuación 4-18 tendremos que el número esperado será $(12 \times 0,276 + 7 \times 0,517 + 6 \times 0,207)/9 = 0,91$.

0(3)	1(6)	0(9)
1(2)	2(5)	1(8)
2(1)	3(4)	2(7)

Total 12
remociones

	0(5)	0(8)	
0(2)	1(4)	1(7)	
1(1)	2(3)	2(6)	0(9)

Total 7
remociones

	0(5)		
1(2)	1(6)	0(7)	0(9)
2(1)	2(4)	1(6)	1(8)

Total 6
remociones

Figura 17 Configuraciones (3330, 3321, 3222) índice 2,25

Pasamos a analizar el siguiente índice (2) correspondiente a 8 containers, para ello y según Figura 17, comprobamos las transiciones de (3330, 3321 y 3222) para 9 containers, analizamos en primer lugar las siguientes transiciones desde (3330):

- Contenedor número 1 → 3300
- Contenedor número 2 → 3310
- Contenedor número 3 → 3320
- Contenedor número 4 → 3220
- Contenedor número 5 → 3221
- Contenedor número 6 → 3221
- Contenedor número 7 → 3320
- Contenedor número 8 → 3311
- Contenedor número 9 → 3320

Con las siguientes distribuciones para (3330)

- Con 8 → $3320 \times 3 + 3311 \times 1 + 3221 \times 2$
- Con 7 → $3310 \times 1 + 3220 \times 1$
- Con 6 → 3300×1

Continuamos con las transiciones de (3321)

- Contenedor número 1 → 3310
- Contenedor número 2 → 3311
- Contenedor número 3 → 3210
- Contenedor número 4 → 3211
- Contenedor número 5 → 3221
- Contenedor número 6 → 3220

- Contenedor número 7 → 3221
- Contenedor número 8 → 3221
- Contenedor número 9 → 3320

Con las siguientes distribuciones para (3321)

- Con 8 → 3320 x 1 + 3311 x 1 + 3221 x 3
- Con 7 → 3310 x 1 + 3220 x 1 + 3211 x 1
- Con 6 → 3210 x 1

Continuamos con las transiciones de (3222)

- Contenedor número 1 → 3320
- Contenedor número 2 → 3221
- Contenedor número 3 → 3222
- Contenedor número 4 → 3221
- Contenedor número 5 → 3320
- Contenedor número 6 → 3320
- Contenedor número 7 → 2222
- Contenedor número 8 → 3220
- Contenedor número 9 → 3221

Con las siguientes distribuciones para (3222)

- Con 8 → 3320 x 3 + 3221 x 3 + 2222 x 1
- Con 7 → 3220 x 2

Las probabilidades de (3320, 3221, 3311 y 2222) serán en base a 2 pasos desde (3333) más 3 desde (3332) más 7 desde (3331 y 3322) más 18 desde (3330, 3321 y 3222) siendo un total de 30 transiciones o pasos. Entonces sus probabilidades de estado serán,

$$S_{8(3320)} = \frac{(1 \times 2)(3333) + (1 \times 2)(3332) + (0,429 \times 1)(3331) + (0,571 \times 2)(3322) + (0,276 \times 3)(3330) + (0,517 \times 1)(3321) + (0,207 \times 3)(3222)}{14,26} = 0,528$$

$$S_{8(3221)} = \frac{(1 \times 1)(3332) + (0,429 \times 1)(3331) + (0,571 \times 23)(3322) + (0,276 \times 2)(3330) + (0,517 \times 3)(3321) + (0,207 \times 3)(3222)}{14,26} = 0,371$$

$$S_{8(3311)} = \frac{(0,429 \times 1)(3331) + (0,276 \times 1)(3330) + (0,517 \times 1)(3321)}{14,26} = 0,086$$

$$S_{8(2222)} = \frac{(0,207 \times 1)(3222)}{14,26} = 0,015$$

Siguiendo el mismo procedimiento, calculamos las remociones correspondientes a un índice igual a 2,00 (8 containers), con las siguientes configuraciones posibles (3320, 3311, 3211 y 2222) siendo sus probabilidades (0,528; 0,086; 0,371 y 0,015) y (7, 6, 5 y 4) las remociones correspondientes, aplicando la ecuación 4-18 tendremos que el número esperado será $(7 \times 0,528 + 6 \times 0,086 + 5 \times 0,371 + 4 \times 0,015)/8 = 0,77$.

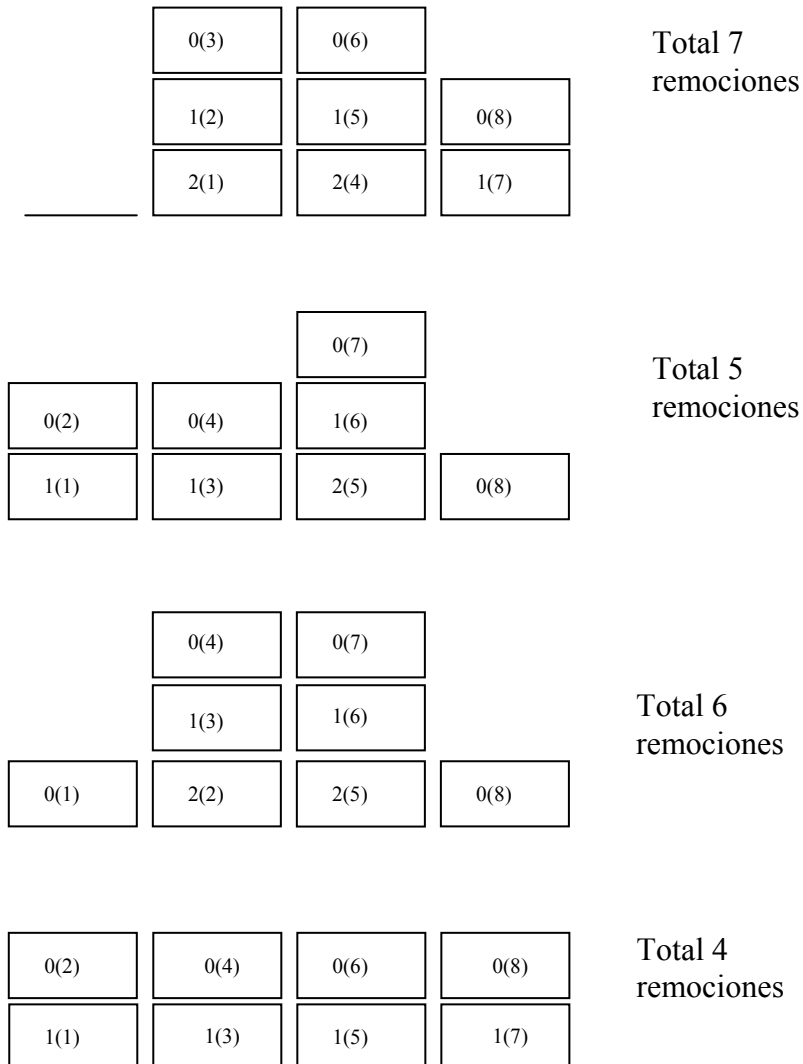


Figura 18 Configuraciones (3320, 3221, 3311, 2222) índice 2,00

Pasamos a analizar el siguiente índice (1,75) correspondiente a 7 containers, para ello y según Figura 18, comprobamos las transiciones de (3320, 3311, 3221 y 2222) para 8 containers, analizamos en primer lugar las siguientes transiciones desde (3320):

- Contenedor número 1 → 3300
- Contenedor número 2 → 3310
- Contenedor número 3 → 3200
- Contenedor número 4 → 3210
- Contenedor número 5 → 3220
- Contenedor número 6 → 3220
- Contenedor número 7 → 3211
- Contenedor número 8 → 3220

Con las siguientes distribuciones para (3320)

- Con 7 $\rightarrow 3220 \times 3 + 3310 \times 1 + 3211 \times 1$
- Con 6 $\rightarrow 3300 \times 1 + 3210 \times 1$
- Con 5 $\rightarrow 3200 \times 1$

Continuamos con las transiciones de (3311)

- Contenedor número 1 $\rightarrow 3310$
- Contenedor número 2 $\rightarrow 3210$
- Contenedor número 3 $\rightarrow 3211$
- Contenedor número 4 $\rightarrow 3211$
- Contenedor número 5 $\rightarrow 3210$
- Contenedor número 6 $\rightarrow 3211$
- Contenedor número 7 $\rightarrow 3211$
- Contenedor número 8 $\rightarrow 3310$

Con las siguientes distribuciones para (3311)

- Con 7 $\rightarrow 3310 \times 2 + 3211 \times 4$
- Con 6 $\rightarrow 3210 \times 2$

Continuamos con las transiciones de (3221)

- Contenedor número 1 $\rightarrow 3310$
- Contenedor número 2 $\rightarrow 3211$
- Contenedor número 3 $\rightarrow 3210$
- Contenedor número 4 $\rightarrow 3211$
- Contenedor número 5 $\rightarrow 3220$
- Contenedor número 6 $\rightarrow 2221$
- Contenedor número 7 $\rightarrow 2221$
- Contenedor número 8 $\rightarrow 3220$

Con las siguientes distribuciones para (3221)

- Con 7 $\rightarrow 3310 \times 1 + 3220 \times 2 + 3211 \times 2 + 2221 \times 2$
- Con 6 $\rightarrow 3210 \times 1$

Continuamos con las transiciones de (2222)

- Contenedor número 1 $\rightarrow 3220$
- Contenedor número 2 $\rightarrow 2221$
- Contenedor número 3 $\rightarrow 3221$
- Contenedor número 4 $\rightarrow 2221$
- Contenedor número 5 $\rightarrow 3220$
- Contenedor número 6 $\rightarrow 2221$
- Contenedor número 7 $\rightarrow 3220$
- Contenedor número 8 $\rightarrow 2221$

Con las siguientes distribuciones para (2222)

- Con 7 $\rightarrow 3220 \times 4 + 2221 \times 4$

Las probabilidades de (3310, 3220, 3310 y 2221) serán en base a 1 desde (3332) más 4 desde (3331, 3322) más 7 desde (3330, 3321, 3222) más 26 desde (3320, 3311, 3221 y 2222) siendo un total de 38 transiciones o pasos. Entonces sus probabilidades de estado serán,

$$S_{8(3310)} = \frac{(0,429 \times 2)(3331) + (0,276 \times 1)(3330) + (0,517 \times 1)(3321) + (0,528 \times 2)(3320) + (0,086 \times 2)(3311) + (0,371 \times 1)(3221)}{11,39} = 0,169$$

$$S_{8(3220)} = \frac{(1 \times 1)(3332) + (0,429 \times 1)(3331) + (0,571 \times 2)(3322) + (0,276 \times 1)(3330) + (0,517 \times 1)(3321) + (0,207 \times 2)(3222)}{11,39} +$$

$$+ \frac{(0,528 \times 3)(3320) + (0,371 \times 2)(3221) + (0,015 \times 1)(2222)}{11,39} = 0,574$$

$$S_{8(3211)} = \frac{(0,517 \times 1)(3321) + (0,528 \times 1)(3320) + (0,086 \times 4)(3311)}{11,39} = 0,187$$

$$S_{8(2221)} = \frac{(0,371 \times 2)(3221) + (0,015 \times 4)(2222)}{11,39} = 0,070$$

Siguiendo el mismo procedimiento, calculamos las remociones correspondientes a un índice igual a 1,75 (7 containers), con las siguientes configuraciones posibles (3310, 3220, 3211 y 2221) siendo sus probabilidades (0,169; 0,574; 0,187 y 0,070) y (6, 5, 4 y 3) las remociones correspondientes, aplicando la ecuación 4-18 tendremos que el número esperado será $(6 \times 0,169 + 5 \times 0,574 + 4 \times 0,187 + 3 \times 0,070)/7 = 0,70$.

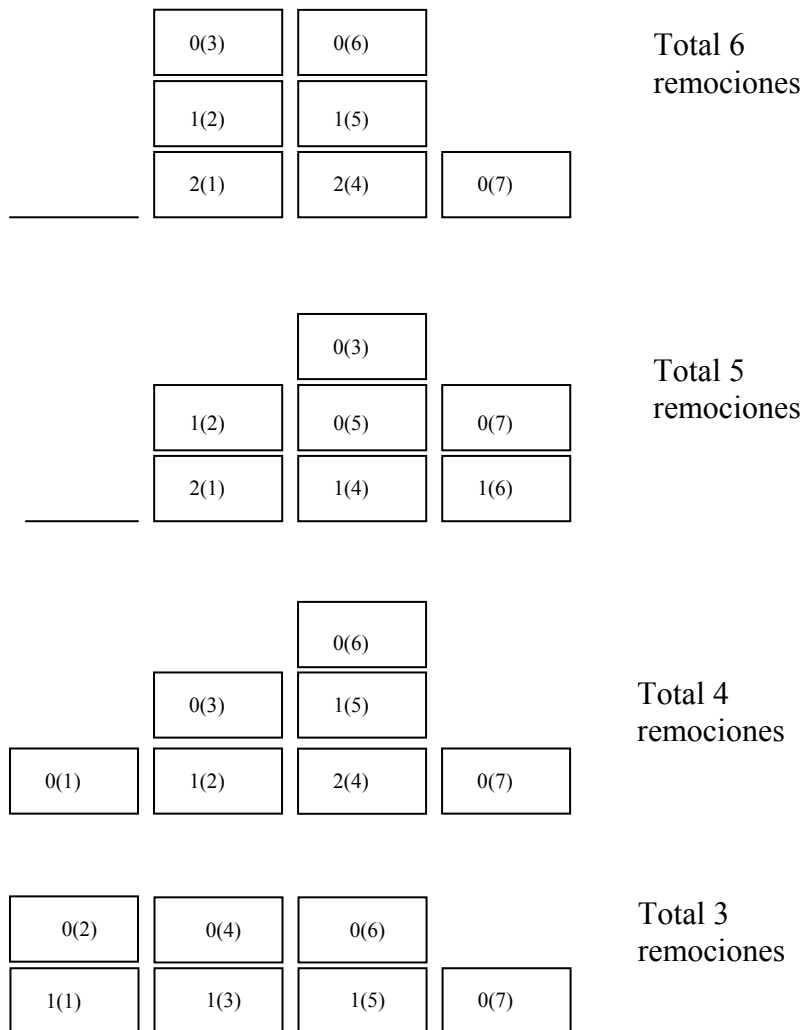


Figura 19 Configuraciones (3310, 3220, 3211, 2221) índice 1,75

Pasamos a analizar el siguiente índice (1,50) correspondiente a 6 containers, para ello y según Figura 19, comprobamos las transiciones de (3310, 3220, 3211 y 2221) para 7 containers, analizamos en primer lugar las transiciones desde (3310):

- Contenedor número 1 → 3210
- Contenedor número 2 → 3111
- Contenedor número 3 → 3210
- Contenedor número 4 → 3200
- Contenedor número 5 → 3210
- Contenedor número 6 → 3210
- Contenedor número 7 → 3300

Con las siguientes distribuciones para (3310)

- Con 6 → $3300 \times 1 + 3210 \times 4 + 3111 \times 1$
- Con 5 → 3200×1

Continuamos con las transiciones de (3220)

- Contenedor número 1 → 3210
- Contenedor número 2 → 3210

- Contenedor número 3 → 2220
- Contenedor número 4 → 2211
- Contenedor número 5 → 2220
- Contenedor número 6 → 3200
- Contenedor número 7 → 3210

Con las siguientes distribuciones para (3220)

- Con 6 → $3210 \times 3 + 2220 \times 2 + 2211 \times 1$
- Con 5 → 3200

Continuamos con las transiciones de (3211)

- Contenedor número 1 → 3210
- Contenedor número 2 → 3210
- Contenedor número 3 → 3111
- Contenedor número 4 → 2220
- Contenedor número 5 → 2211
- Contenedor número 6 → 2211
- Contenedor número 7 → 3210

Con las siguientes distribuciones para (3211)

- Con 6 → $3210 \times 3 + 3111 \times 1 + 2220 \times 1 + 2211 \times 2$

Continuamos con las transiciones de (2221)

- Contenedor número 1 → 2220
- Contenedor número 2 → 2211
- Contenedor número 3 → 2220
- Contenedor número 4 → 2211
- Contenedor número 5 → 2220
- Contenedor número 6 → 2211
- Contenedor número 7 → 2220

Con las siguientes distribuciones para (2221)

- Con 6 → $2211 \times 3 + 2220 \times 4$

Las transiciones son 2 de (3330, 3321) 5 de (3320, 3311, 3211) y del índice anterior en este caso de 1,75 (7 containers) el resto 26 transiciones, en total son 33 pasos. Las probabilidades de (3300, 3210, 3111, 2220 y 2211) serán,

$$S_{6(3300)} = \frac{(0,276 \times 1)(3330) + (0,528 \times 1)(3320) + (0,201 \times 1)(3310)}{8,65} = 0,112$$

$$S_{6(3210)} = \frac{(0,517 \times 1)(3321) + (0,528 \times 1)(3320) + (0,086 \times 2)(3311) + (0,371 \times 1)(3221)}{8,65} +$$

$$+ \frac{(0,201 \times 4)(3310) + (0,541 \times 3)(3220) + (0,187 \times 3)(3211)}{8,65} = 0,526$$

$$S_{6(3111)} = \frac{(0,201 \times 1)(3310) + (0,187 \times 1)(3211)}{8,65} = 0,041$$

$$S_{6(2220)} = \frac{(0,541 \times 2)(3220) + (0,187 \times 1)(3211) + (0,070 \times 4)(2221)}{8,65} = 0,187$$

$$S_{6(2211)} = \frac{(0,541 \times 1)(3220) + (0,187 \times 2)(3211) + (0,070 \times 3)(2221)}{8,65} = 0,134$$

Siguiendo el mismo procedimiento, calculamos las remociones correspondientes a un índice igual a 1,50 (6 containers), con las siguientes configuraciones posibles (3300, 3210, 3111, 2220 y 2211) siendo sus probabilidades (0,112; 0,526; 0,041; 0,187 y 0,134) y (6, 4, 3, 3 y 2) las remociones correspondientes, aplicando la ecuación 4-18 tendremos que el número esperado será $(6 \times 0,112 + 4 \times 0,526 + 3 \times 0,041 + 3 \times 0,187 + 2 \times 0,134)/6 = 0,58$.

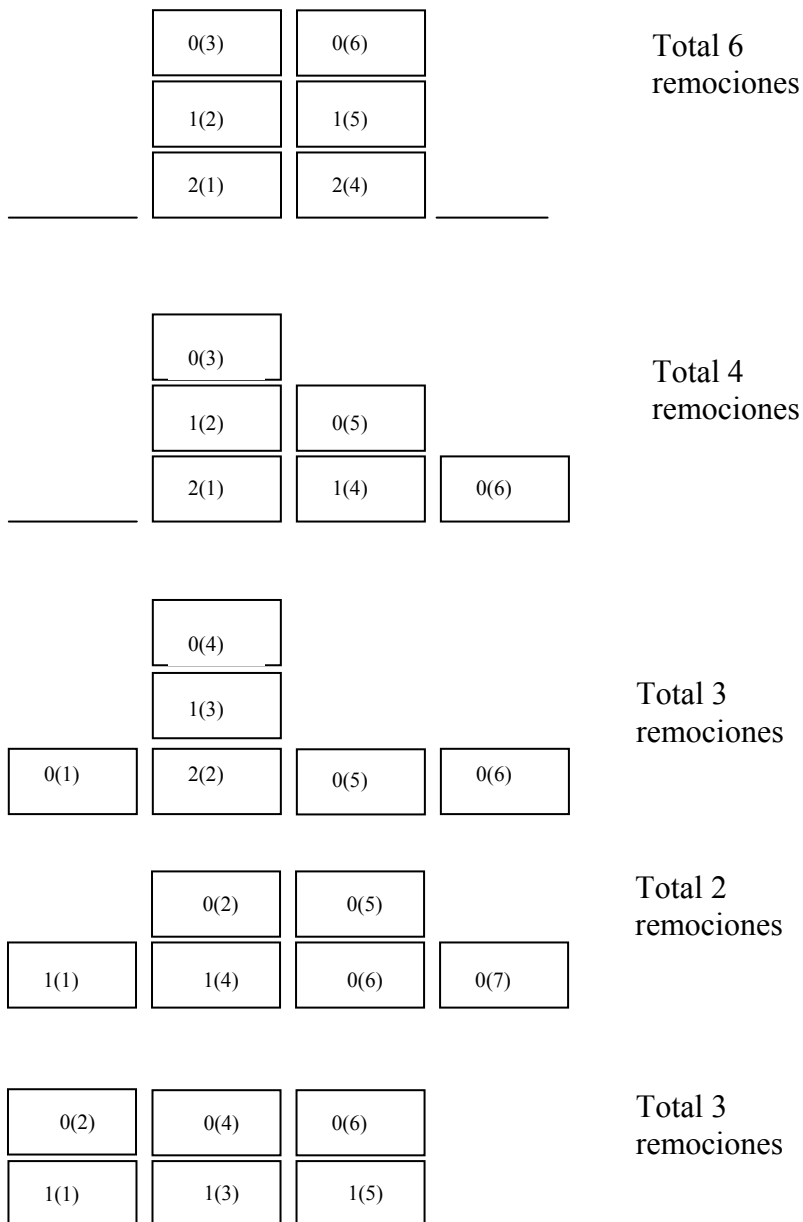


Figura 20 Configuraciones (3300, 3210, 3111, 2211, 2220) índice 1,50

Pasamos a analizar el siguiente índice (1,25) correspondiente a 5 containers, para ello y según Figura 20, comprobamos las transiciones de (3300, 3210, 3111, 2211 y 2220) para 6 containers, analizamos en primer lugar las siguientes transiciones desde (3300):

- Contenedor número 1 → 3200
- Contenedor número 2 → 3110
- Contenedor número 3 → 3200
- Contenedor número 4 → 3200
- Contenedor número 5 → 3110
- Contenedor número 6 → 3200

Con las siguientes distribuciones para (3300)

- Con 5 → $3200 \times 4 + 3110 \times 2$

Continuamos con las transiciones de (3210)

- Contenedor número 1 \rightarrow 2210
- Contenedor número 2 \rightarrow 2111
- Contenedor número 3 \rightarrow 2210
- Contenedor número 4 \rightarrow 3200
- Contenedor número 5 \rightarrow 3110
- Contenedor número 6 \rightarrow 3200

Con las siguientes distribuciones para (3210)

- Con 5 \rightarrow $3200 \times 2 + 3110 \times 1 + 2210 \times 2 + 2111 \times 1$

Continuamos con las transiciones de (3111)

- Contenedor número 1 \rightarrow 3110
- Contenedor número 2 \rightarrow 2210
- Contenedor número 3 \rightarrow 2111
- Contenedor número 4 \rightarrow 2111
- Contenedor número 5 \rightarrow 3110
- Contenedor número 6 \rightarrow 3110

Con las siguientes distribuciones para (3111)

- Con 5 \rightarrow $3110 \times 3 + 2210 \times 1 + 2111 \times 2$

Continuamos con las transiciones de (2211)

- Contenedor número 1 \rightarrow 2210
- Contenedor número 2 \rightarrow 2111
- Contenedor número 3 \rightarrow 2111
- Contenedor número 4 \rightarrow 2210
- Contenedor número 5 \rightarrow 2111
- Contenedor número 6 \rightarrow 2210

Con las siguientes distribuciones para (2211)

- Con 5 \rightarrow $2210 \times 3 + 2111 \times 3$

Continuamos con las transiciones de (2220)

- Contenedor número 1 \rightarrow 2210
- Contenedor número 2 \rightarrow 2210
- Contenedor número 3 \rightarrow 2210
- Contenedor número 4 \rightarrow 2210
- Contenedor número 5 \rightarrow 2210
- Contenedor número 6 \rightarrow 2210

Con las siguientes distribuciones para (2220)

- Con 5 \rightarrow 2210×6

Las probabilidades de (3200, 3110, 2210 y 2111) serán en base a 1 paso desde (3320), 2 pasos desde (3310, 3220) y 30 pasos desde (3300, 3210, 3111, 2211 y 2220) siendo un total de 33 transiciones o pasos. Entonces sus probabilidades de estado serán,

$$S_{5(3200)} = \frac{(0,528 \times 1)(3320) + (0,169 \times 1)(3310) + (0,574 \times 1)(3220) + (0,112 \times 4)(3300) + (0,041 \times 2)(3210)}{7,27} = 0,381$$

$$S_{5(3110)} = \frac{(0,112 \times 2)(3300) + (0,041 \times 1)(3210) + (0,526 \times 3)(3111)}{7,27} = 0,120$$

$$S_{5(2210)} = \frac{(0,041 \times 2)(3210) + (0,526 \times 1)(3111) + (0,187 \times 6)(2220) + (0,134 \times 4)(2211)}{7,27} = 0,378$$

$$S_{5(2111)} = \frac{(0,041 \times 1)(3210) + (0,526 \times 2)(3111) + (0,134 \times 2)(2211)}{7,27} = 0,120$$

Siguiendo el mismo procedimiento, calculamos las remociones correspondientes a un índice igual a 1,25 (5 containers), con las siguientes configuraciones posibles (3200, 3110, 2210, y 2111) siendo sus probabilidades (0,381; 0,120; 0,378 y 0,120) y (4, 3, 2, y 1) las remociones correspondientes, aplicando la ecuación 4-18 tendremos que el número esperado será $(4 \times 0,381 + 3 \times 0,120 + 2 \times 0,378 + 1 \times 0,120)/5 = 0,55$.

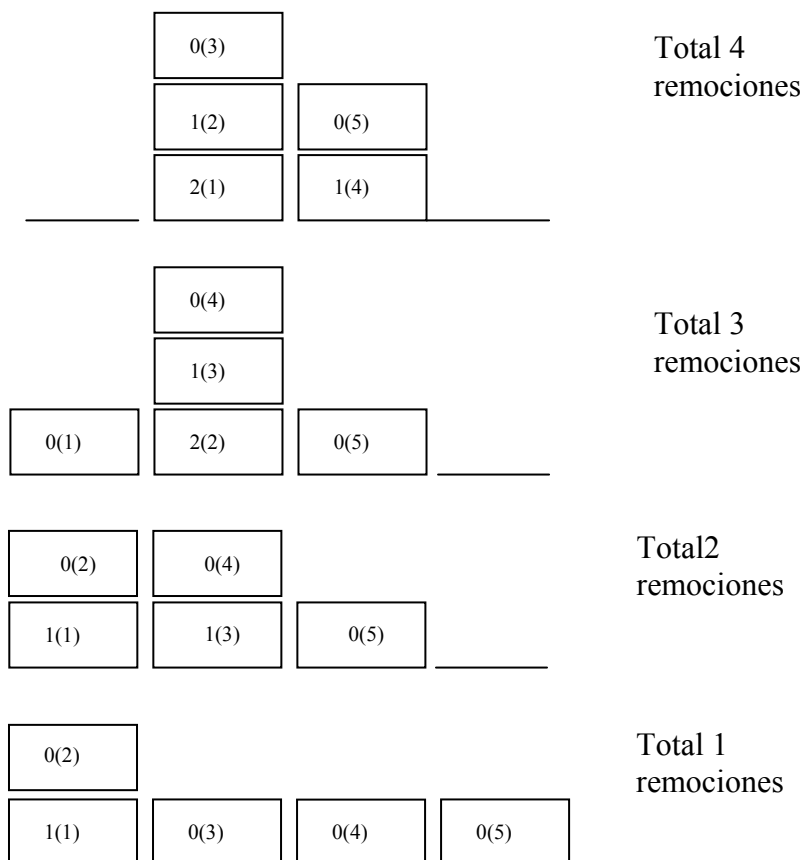


Figura 21 Configuraciones (3200, 3110, 2210, 2111) índice 1,25

Pasamos a analizar el siguiente índice (**1,00**) correspondiente a **4** containers, para ello y según Figura 21, comprobamos las transiciones de (3200, 3110, 2210, y 2111) para 5 containers, analizamos en primer lugar las siguientes transiciones desde (3200):

- Contenedor número 1 \rightarrow 2110
- Contenedor número 2 \rightarrow 2110
- Contenedor número 3 \rightarrow 2200
- Contenedor número 4 \rightarrow 3100
- Contenedor número 5 \rightarrow 3100

Con las siguientes distribuciones para (3100)

- Con 4 \rightarrow $3100 \times 2 + 2200 \times 1 + 2 \times 2110$

Continuamos con las transiciones de (3110)

- Contenedor número 1 \rightarrow 3100
- Contenedor número 2 \rightarrow 2110
- Contenedor número 3 \rightarrow 1111
- Contenedor número 4 \rightarrow 2110
- Contenedor número 5 \rightarrow 3100

Con las siguientes distribuciones para (3110)

- Con 4 \rightarrow $3100 \times 2 + 2110 \times 2 + 1111 \times 1$

Continuamos con las transiciones de (2210)

- Contenedor número 1 \rightarrow 2110
- Contenedor número 2 \rightarrow 2110
- Contenedor número 3 \rightarrow 2110
- Contenedor número 4 \rightarrow 2110
- Contenedor número 5 \rightarrow 2200

Con las siguientes distribuciones para (2210)

- Con 4 \rightarrow $2200 \times 1 + 2110 \times 4$

Continuamos con las transiciones de (2111)

- Contenedor número 1 \rightarrow 2110
- Contenedor número 2 \rightarrow 2110
- Contenedor número 3 \rightarrow 2110
- Contenedor número 4 \rightarrow 1111
- Contenedor número 5 \rightarrow 2110

Con las siguientes distribuciones para (2111)

- Con 4 \rightarrow $2110 \times 4 + 1111 \times 1$

Las probabilidades de (3100, 2200, 2110 y 1111) serán en base a 20 pasos desde (3200, 3110, 2210, y 2111) en este caso todas las transiciones posibles vienen del índice anterior (1,25) para 5 containers. Entonces sus probabilidades de estado serán,

$$S_{4(3100)} = \frac{(0,381 \times 2)(3200) + (0,120 \times 2)(3110)}{5} = 0,201$$

$$S_{4(2200)} = \frac{(0,381 \times 1)(3200) + (0,378 \times 1)(2210)}{5} = 0,152$$

$$S_{4(2110)} = \frac{(0,381 \times 2)(3200) + (0,120 \times 2)(3110) + (0,378 \times 4)(2210) + (0,120 \times 4)(2111)}{5} = 0,599$$

$$S_{4(1111)} = \frac{(0,120 \times 1)(3110) + (0,120 \times 1)(2111)}{5} = 0,048$$

Siguiendo el mismo procedimiento, calculamos las remociones correspondientes a un índice igual a 1,00 (4 containers), con las siguientes configuraciones posibles (3100, 2200, 2110, y 1111) siendo sus probabilidades (0,201; 0,152; 0,599 y 0,048) y (3, 2, 1 y 0) las remociones correspondientes, aplicando la ecuación 4-18 tendremos que el número esperado será $(3 \times 0,201 + 2 \times 0,152 + 1 \times 0,599)/4 = 0,38$.

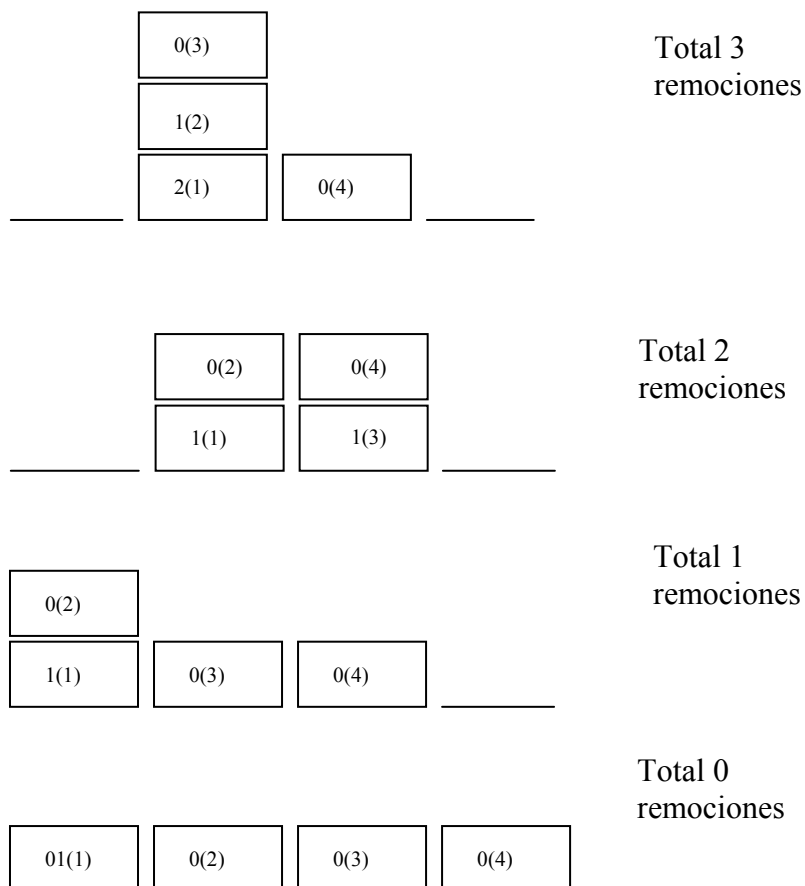


Figura 22 Configuraciones (3100, 2200, 2110, 1111) índice 1,00

Pasamos a analizar el siguiente índice (**0,75**) correspondiente a **3** containers, para ello y según Figura 22, comprobamos las transiciones de (3100, 2200, 2110, y 1111) para 4 containers, analizamos en primer lugar las siguientes transiciones desde (3100):

- Contenedor número 1 → 1110
- Contenedor número 2 → 1110
- Contenedor número 3 → 2100
- Contenedor número 4 → 3000

Con las siguientes distribuciones para (3100)

- Con 3 → $3000 \times 1 + 2100 \times 1 + 1110 \times 2$

Continuamos con las transiciones de (2200)

- Contenedor número 1 → 2100
- Contenedor número 2 → 2100
- Contenedor número 3 → 2100
- Contenedor número 4 → 2100

Con las siguientes distribuciones para (2200)

- Con 3 → 2100×4

Continuamos con las transiciones de (2110)

- Contenedor número 1 → 1110
- Contenedor número 2 → 1110
- Contenedor número 3 → 2100
- Contenedor número 4 → 2100

Con las siguientes distribuciones para (2110)

- Con 3 → $2100 \times 2 + 1110 \times 2$

Continuamos con las transiciones de (1111)

- Contenedor número 1 → 1110
- Contenedor número 2 → 1110
- Contenedor número 3 → 1110
- Contenedor número 4 → 1110

Con las siguientes distribuciones para (1111)

- Con 3 → 1110×4

Las probabilidades de (3000, 2100 y 1110) serán en base a 4 pasos desde cada una de las configuraciones de 4 containers (3100, 2200, 2110, y 1111) siendo un total de 16 transiciones o pasos. Entonces sus probabilidades de estado serán,

$$S_{3(3000)} = \frac{(0,201 \times 1)(3100)}{4} = 0,050$$

$$S_{3(2100)} = \frac{(0,201 \times 1)(3100) + (0,152 \times 4)(2200) + (0,599 \times 3)(2110)}{4} = 0,502$$

$$S_{3(1110)} = \frac{(0,599 \times 1)(2110) + (0,048 \times 4)(1111)}{4} = 0,448$$

Siguiendo el mismo procedimiento, calculamos las remociones correspondientes a un índice igual a 0,75 (3 containers), con las siguientes configuraciones posibles (3000, 2100 y 1110) siendo sus probabilidades (0,050; 0,502 y 0,448) y (3, 1 y 0) las remociones correspondientes, aplicando la ecuación 4-18 tendremos que el número esperado será $(3 \times 0,050 + 1 \times 0,502)/3 = 0,22$.

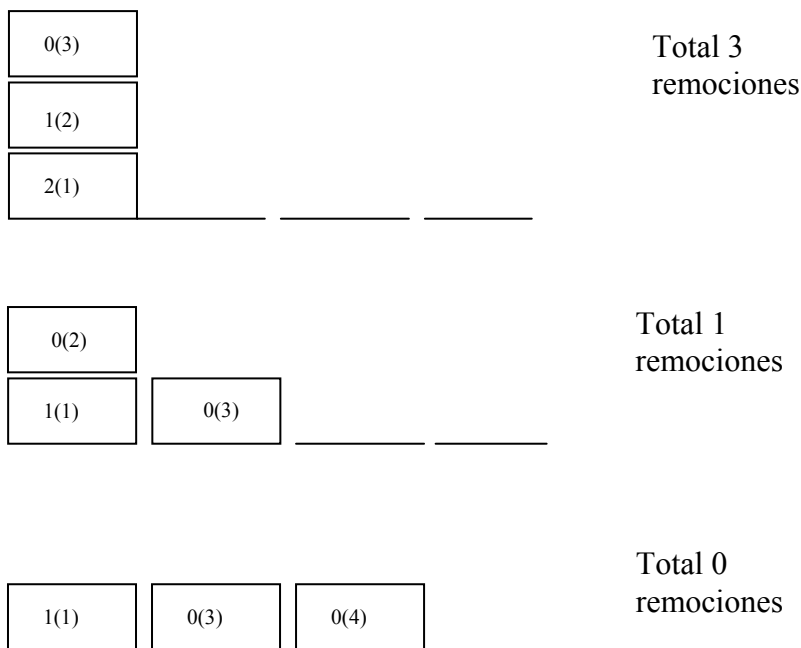


Figura 23 Configuraciones (3000, 2100, 1110) índice 0,75

Pasamos a analizar el siguiente índice (**0,50**) correspondiente a **2** containers, para ello y según Figura 23 comprobamos las transiciones de (3000, 2100, y 1110) para 3 containers, analizamos en primer lugar las siguientes transiciones desde (3000):

- Contenedor número 1 → 1100
- Contenedor número 2 → 1100
- Contenedor número 3 → 2000

Con las siguientes distribuciones para (3000)

- Con 2 → 2000 x 1 + 1100 x 2

Continuamos con las transiciones de (2100)

- Contenedor número 1 → 1100
- Contenedor número 2 → 1100
- Contenedor número 3 → 2000

Con las siguientes distribuciones para (2100)

- Con 2 → 2000 x 1 + 1100 x 2

Continuamos con las transiciones de (1110)

- Contenedor número 1 → 1100
- Contenedor número 2 → 1100
- Contenedor número 3 → 1100

Con las siguientes distribuciones para (1110)

- Con 2 → 1110 x 3

Las probabilidades de (2000, y 1100) serán en base a 3 pasos desde cada una de las configuraciones (3000, 2100 y 1110) siendo un total de 9 transiciones o pasos. Entonces sus probabilidades de estado serán,

$$S_{2(2000)} = \frac{(0,050 \times 1)(3000) + (0,502 \times 1)(2100)}{3} = 0,184$$

$$S_{2(1100)} = \frac{(0,050 \times 2)(3000) + (0,502 \times 2)(2100) + (0,448 \times 3)(1110)}{3} = 0,816$$

Calculamos las remociones correspondientes a un índice igual a 0,5 (2 containers), con las siguientes configuraciones posibles (2000 y 1110) siendo sus probabilidades (0,184 y 0,816) y (1 y 0) las remociones correspondientes, aplicando la ecuación 4-18 tendremos que el número esperado será $(1 \times 0,184)/2 = 0,09$.

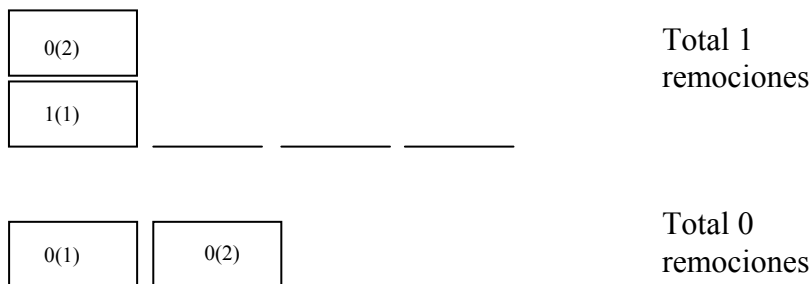


Figura 24 Configuraciones (2000, 1100) índice 0,50

Evidentemente para 1 container índice 0,25 las remociones son cero. Todo este cálculo está sintetizado en la Tabla 8 y Anexos C y D.

Las tablas de transición del Anexo D son el modelo empírico-heurístico en base al cual intentaremos encontrar un modelo analítico que nos permita calcular el número de remociones para un índice cualquiera de una manera más sencilla.

4.3.5 Modelo analítico. Cálculo de las remociones esperadas totales en el próximo movimiento

El número de remociones de una bahía es función del índice (n), de la altura máxima (N), paso de máquina (p), número de pilas (r), configuración, estado (posición de los huecos y contenedores) y distribución de probabilidades.

Kim (1997) realizó una aproximación mediante un modelo de regresión lineal, este modelo tiene el inconveniente de que para cada dimensión ($N \times r$) es necesario aplicar unos parámetros distintos a la ecuación de regresión, aunque resolvió el problema tabulando los mismos para las dimensiones más usuales. En cualquier caso como podemos adivinar por los datos del modelo¹, la función que mejor se ajusta a esta dependencia de tipo estadístico no es lineal sino que se consigue mediante una regresión polinómica del tipo $ax^2 + bx + c$ con parámetros a, b, c , con lo cual sería necesario crear una tabla de doble entrada que nos daría los parámetros en función de la altura máxima y del número de pilas ($N \times r$).

En este trabajo intentaremos encontrar un modelo analítico válido para cualquier dimensión sin necesidad de utilizar tablas de parámetros.

Si corregimos la ecuación 4-13 por el grado de cierre $k=k(n; N, p, h, r)$, tendremos el número esperado de remociones para una bahía abierta con un índice cualquiera de altura n ,

$$S_m = \left(\frac{n-1}{2} + \frac{r-2}{4} + \frac{(1-(-1)^r)}{8r} \right) k . \quad \text{Ecuación 4-16}$$

Definimos el grado de cierre como el número máximo de torres con altura (N), para un índice (n), en relación al número máximo de pilas en la bahía, es decir cuantas más torres menor accesibilidad.

$$k = \frac{nr}{N} = \frac{n}{N} . \quad \text{Ecuación 4-17}$$

¹ No es lineal, incluso considerando solamente las remociones directas se observa cierto grado de convexidad

Entonces podemos decir que el grado de cierre es igual al índice de ocupación (n/N), pero tenemos que la expresión $(n-1)/2$ es cero o negativa para índices iguales o menores que uno², cuando en realidad si consideramos $r > 1$, puede suceder que tengamos remociones.

Si sustituimos $(n-1)/2$ por $(N-1)/2$ y multiplicamos por el índice de ocupación (n/N) eliminamos el error para índices iguales o menores que uno y además ajustamos mucho mejor las remociones para índices medios. Esto es debido a que para índices medios y bajos el valor medio n es siempre el mejor de los casos posibles al existir torres con cero containers (ver nota 2).

$$S_m = \left(\frac{N-1}{2} + \frac{r-2}{4} + \frac{(1-(-1)^r)}{8r} \right) \left(\frac{n}{N} \right) \text{ Ecuación 4-18}$$

No obstante en esta última expresión observamos que para índices bajos de ocupación sobrevaloramos un poco las remociones, por ejemplo para un solo container tenemos remociones. En consecuencia añadimos una segunda corrección restando el cociente incremental de las remociones con respecto al índice de ocupación (containers), considerando que el número de containers (x) tiene incrementos finitos e iguales a uno. Así para 1 container tendremos cero remociones.

sabemos que,

$$n = \frac{x}{r}$$

por lo tanto,

$$dn = \frac{dx}{r}$$

para $dx = \Delta x = 1$

$$\Delta n = \frac{\Delta x}{r}$$

$$\Delta n = \frac{1}{r}$$

Este es el cociente incremental entre el índice de altura y el número de containers. Ahora calculamos el cociente incremental entre remociones e índice de altura.

² Para una sola pila, pero para $r > 1$ pueden haber remociones. Por ejemplo, en las configuraciones (3000, 2100, 1110) con (1; 0,33; 0) remociones por container respectivamente, siendo el índice en los tres casos igual a 0,75. Además no pueden haber remociones negativas.

$$d\left(\frac{N-1}{2} \frac{n}{N}\right) = \frac{N-1}{2} \left(\frac{dn}{N}\right) = \frac{N-1}{2} \frac{dx}{N} = \frac{N-1}{2} \frac{dx}{Nr}$$

haciendo $dx = \Delta x = 1$

$$\Delta\left(\frac{N-1}{2} \frac{n}{N}\right) = \frac{N-1}{2} \frac{1}{Nr}$$

Al restar este cociente incremental al primer término del segundo miembro eliminamos el error que nos daba remociones para un solo container.

$$S_m = \left(\frac{N-1}{2}\right) \frac{n}{N} - \frac{N-1}{2} \frac{1}{Nr} + \left(\frac{r-2}{4} + \frac{1-(-1)^r}{8r}\right) \left(\frac{n}{N}\right) \quad \text{Ecuación 4-19}$$

Para completar esta última corrección tendremos en cuenta que esta varía en función del índice de ocupación (n/N), debido a que para índices altos ésta tiende a cero, al no haber torres con cero containers, y por el contrario crece con el número de huecos para ocupaciones bajas, entonces siendo el número de huecos (h),

$$h = Nr - nr = r(N - n)$$

entonces el índice de huecos será,

$$i_h = \frac{r(N - n)}{Nr} = \frac{N - n}{N},$$

aplicando esta última expresión conseguimos que la corrección tienda a cero para índices altos y sea máxima para un solo container³. En definitiva lo que hemos hecho es corregir por grado de cierre y ajustar por número de huecos.

$$S_m = \frac{N-1}{2} \frac{n}{N} - \frac{N-n}{N} \frac{N-1}{2} \frac{1}{Nr} + \left(\frac{r-2}{4} + \frac{1-(-1)^r}{8r}\right) \left(\frac{n}{N}\right) \quad \text{Ecuación 4-20}$$

En la ecuación anterior los dos primeros términos calculan las remociones directas y los dos últimos entre paréntesis las indirectas.

Por último solo nos falta ajustar las remociones indirectas en función del paso de máquina y grado de cierre (n/N).

³ En realidad es máxima para cero containers, en cuyo caso no existe el bloque de containers.

En cuanto al paso de máquina, la relación entre la altura máxima y el paso (N/p) para $p \geq N$ nos ajustará las remociones indirectas en función del número de pilas (r), esta corrección es una potencia $(N/p)^r$, evidentemente para $p > N$ esta corrección tiende a cero a medida que aumenta el número de pilas⁴ r , por ejemplo para $N=3$; $r=14$ y $p=4$ será 0,017 remociones.

Solamente falta ajustar el grado de cierre con respecto al paso de máquina, para ello utilizaremos también una potencia del grado de cierre $(n/N)^{p+1}$, evidentemente esto indica que cuanto mayor sea el paso de máquina menor será la corrección por cierre.

El hecho de que elevemos la razón a $p+1$ es que experimentalmente hemos comprobado que para un exponente p la curva teórica queda por encima de la curva del modelo empírico, para un exponente $p+2$ queda por debajo mientras que para $p+1$ se ajusta al modelo empírico.

En cualquier caso siempre ha de ser⁵ $p > N-1$ y en consecuencia $p+1 > N$ esto quiere decir que para un paso superior en uno a la altura máxima las remociones indirectas tienden siempre a cero.

Entonces ajustando las remociones indirectas⁶ según párrafos anteriores tendremos,

$$S_m = \frac{N-1}{2} \frac{n}{N} - \frac{N-n}{N} \frac{N-1}{2} \frac{1}{Nr} + \left(\frac{r-2}{4} + \frac{1-(-1)^r}{8r} \right) \left(\frac{n}{N} \right)^{p+1} \left(\frac{N}{p} \right)^r \quad \text{Ecuación 4-21}$$

Esta es la expresión funcional que nos relaciona el número total de remociones directas más indirectas en función del índice de altura, altura máxima, número de pilas, paso de máquina y grado de cierre.

Los siguientes gráficos muestran una comparación entre la función analítica encontrada y el modelo⁷ para las diferentes dimensiones.

⁴ Esto es debido a que aunque $p > N$ cuando la bahía está llena debemos sacar los primeros containers a otras calles por falta de huecos. En consecuencia aunque físicamente son remociones directas debemos de considerar que existe una penalización por cambio de bahía o calle.

⁵ Para $p=N$ las remociones indirectas tienden a cero a partir de $N-1$.

⁶ Puede darse el caso de tener máquinas con diferentes pasos, en cuyo caso habrá que ponderar cada uno en función del número de máquinas correspondientes y utilizar una máquina de paso medio ponderado.

⁷ Hablamos de un modelo, dado que no son datos sacados directamente de la operativa, sería muy laborioso recopilar este tipo de datos. Para solucionarlo hemos elaborado un modelo heurístico con ayuda del cálculo de probabilidades.

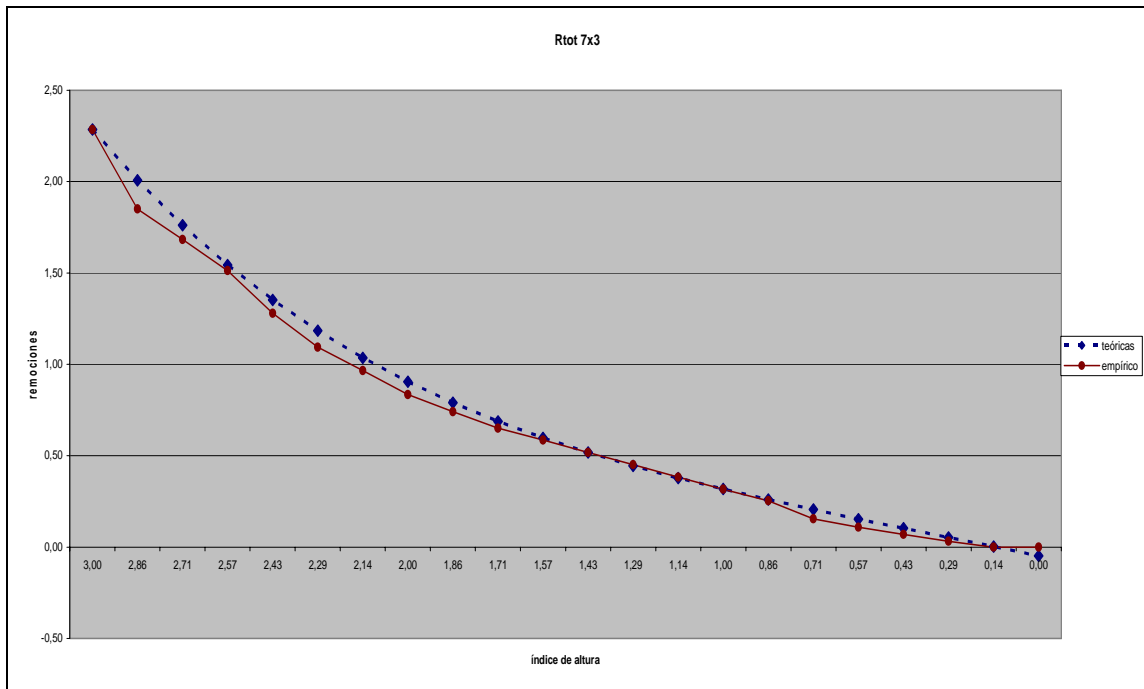


Gráfico 10 Remociones esperadas para el próximo movimiento dimensión (3 x 7)

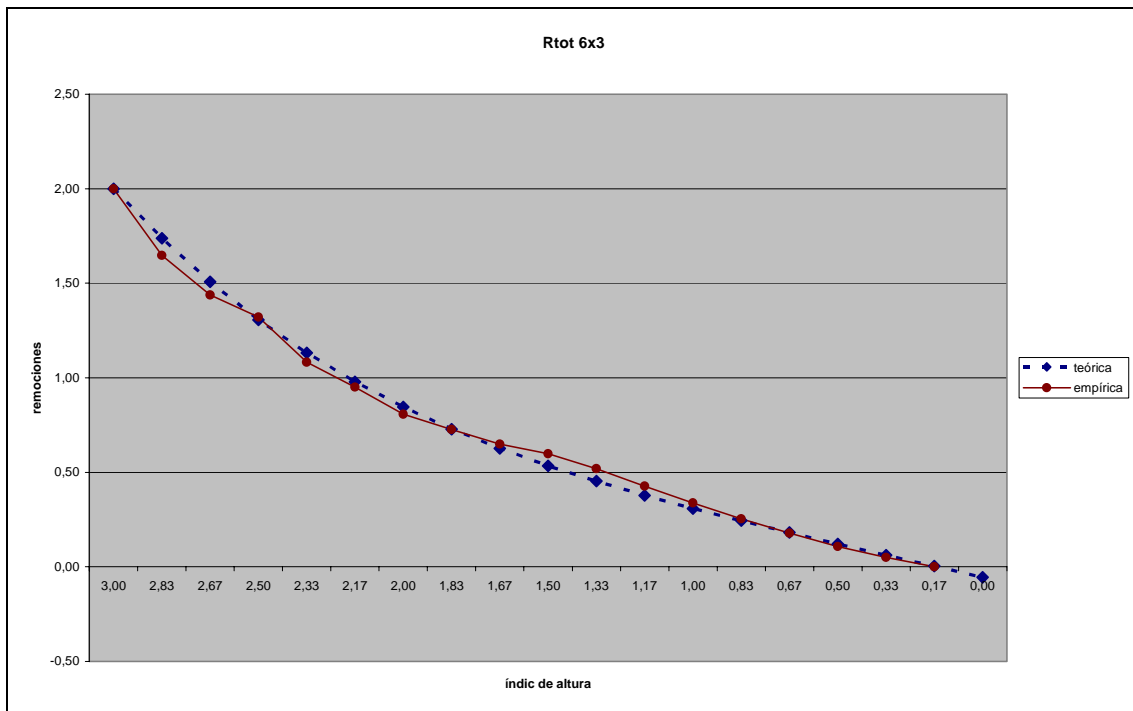


Gráfico 11 Remociones esperadas para el próximo movimiento dimensión (3 x 6)

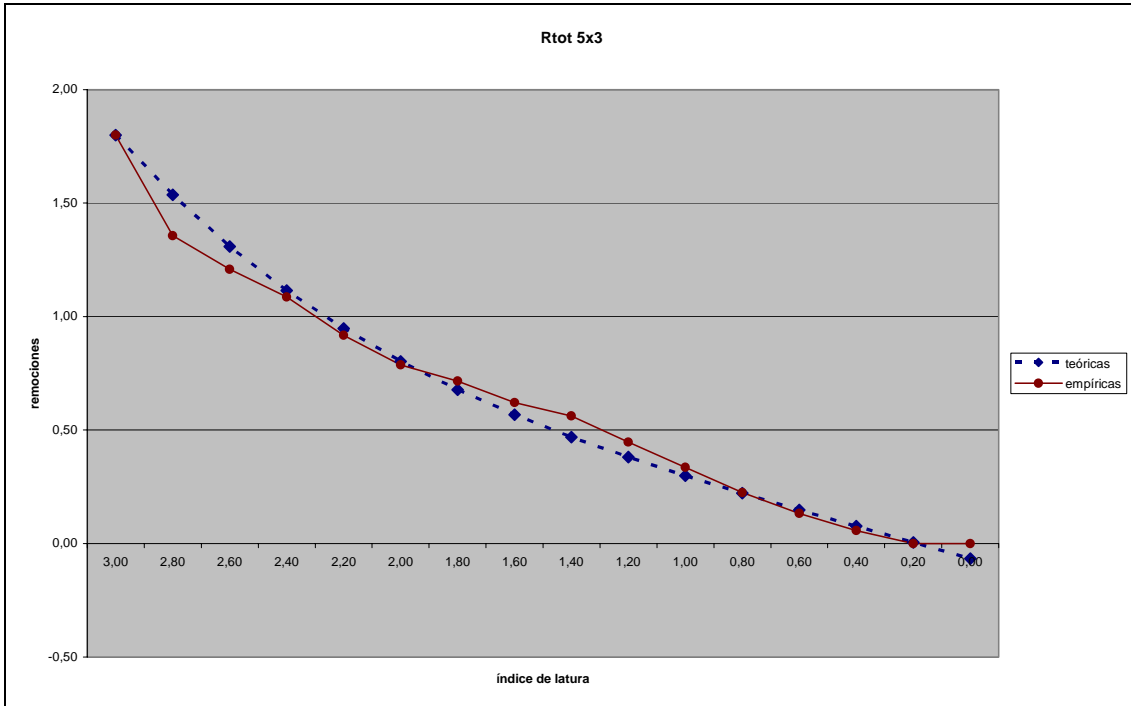


Gráfico 12 Remociones esperadas para el próximo movimiento dimensión (3 x 5)

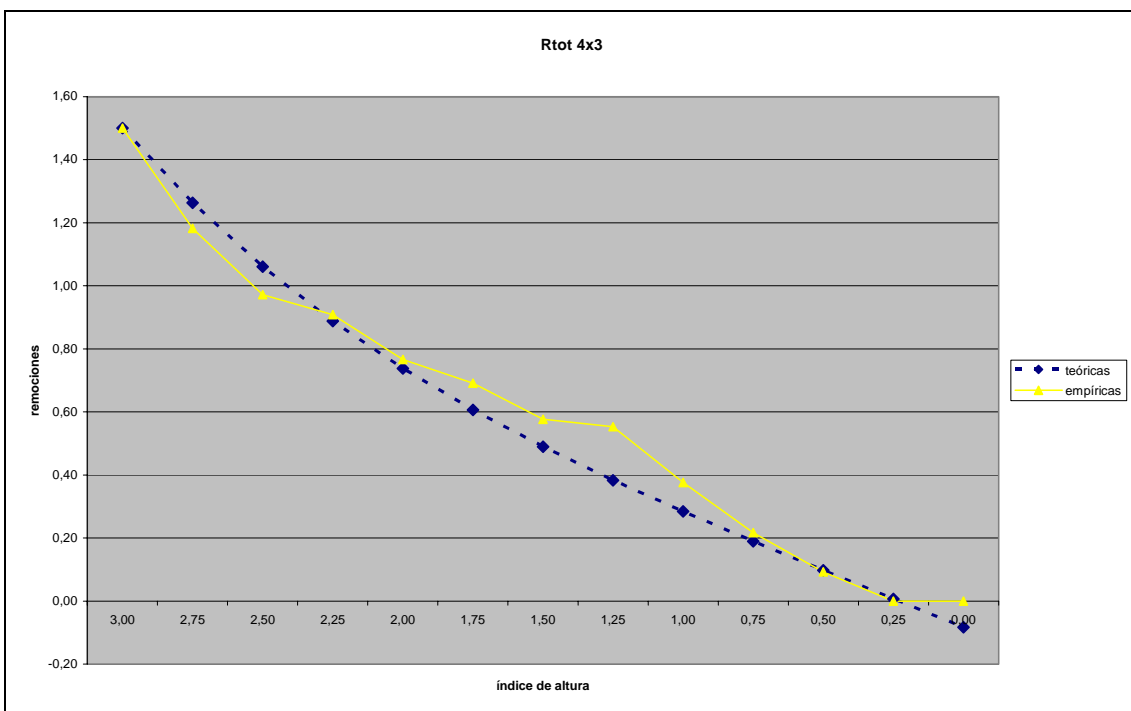


Gráfico 13 Remociones esperadas para el próximo movimiento dimensión (3 x 4)

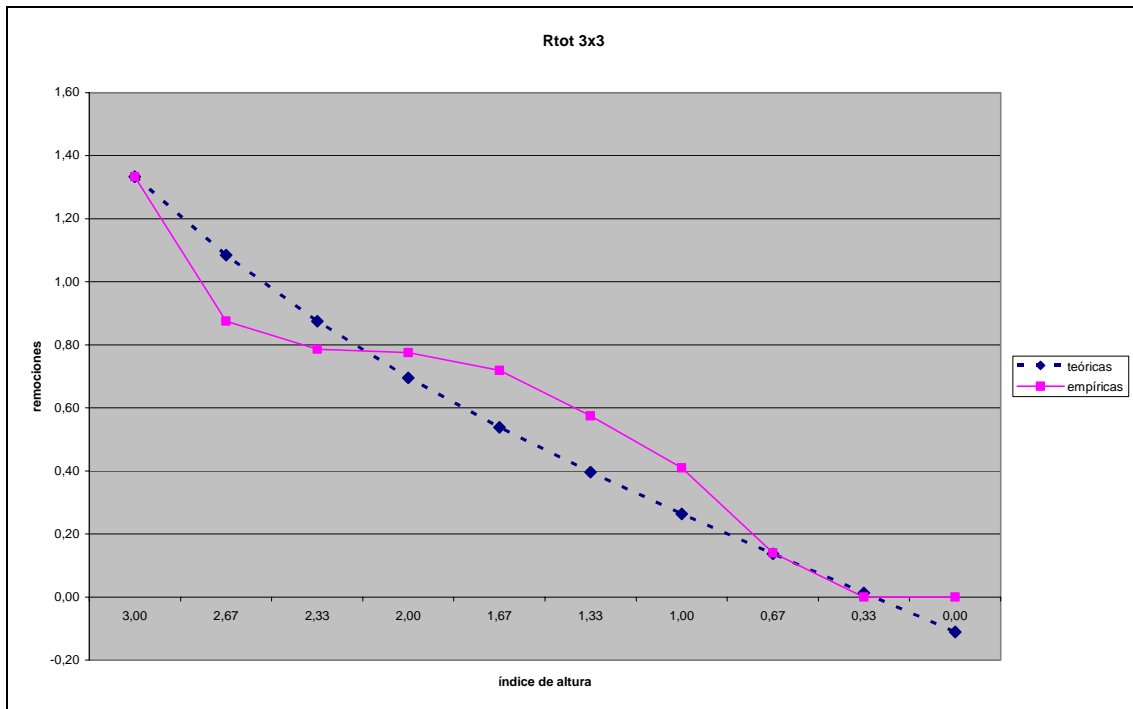


Gráfico 14 Remociones esperadas para el próximo movimiento dimensión (3 x 3)

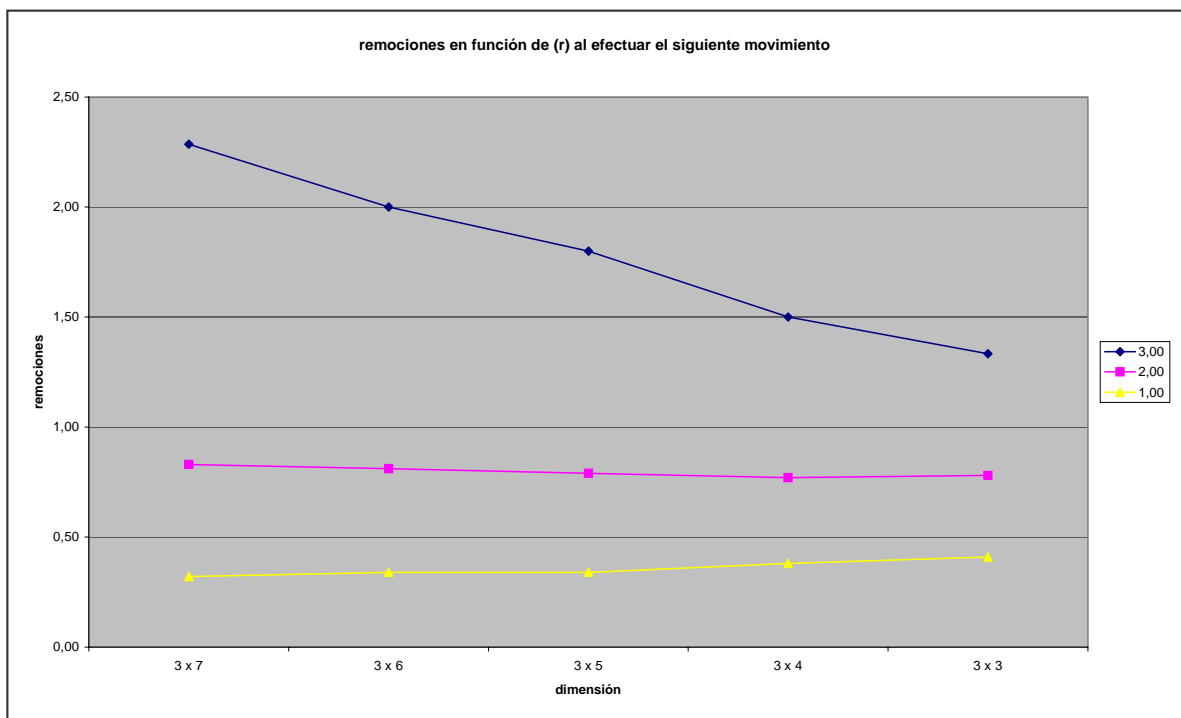


Gráfico 15 Remociones esperadas S_m en función del número de pilas, siendo $p=N$ y para $n=1, 2, 3$.

En el gráfico anterior podemos analizar como varía el número de remociones esperado al realizar el próximo movimiento en función del número de pilas (r) para tres series correspondientes a los índices de altura (3,2,1) ó a los índices de ocupación (1; 0,67; 0,33). Es decir la línea azul indica las remociones parametrizadas con índice de altura (3) ó con índice de ocupación (1), la línea fucsia para (2; 0,67) y la amarilla para (1; 0,33).

Observamos que para un índice de altura igual al paso de máquina menos uno ($p-1$) las remociones son prácticamente insensibles al número de pilas, esto es debido a que las remociones indirectas son casi nulas con este grado de ocupación.

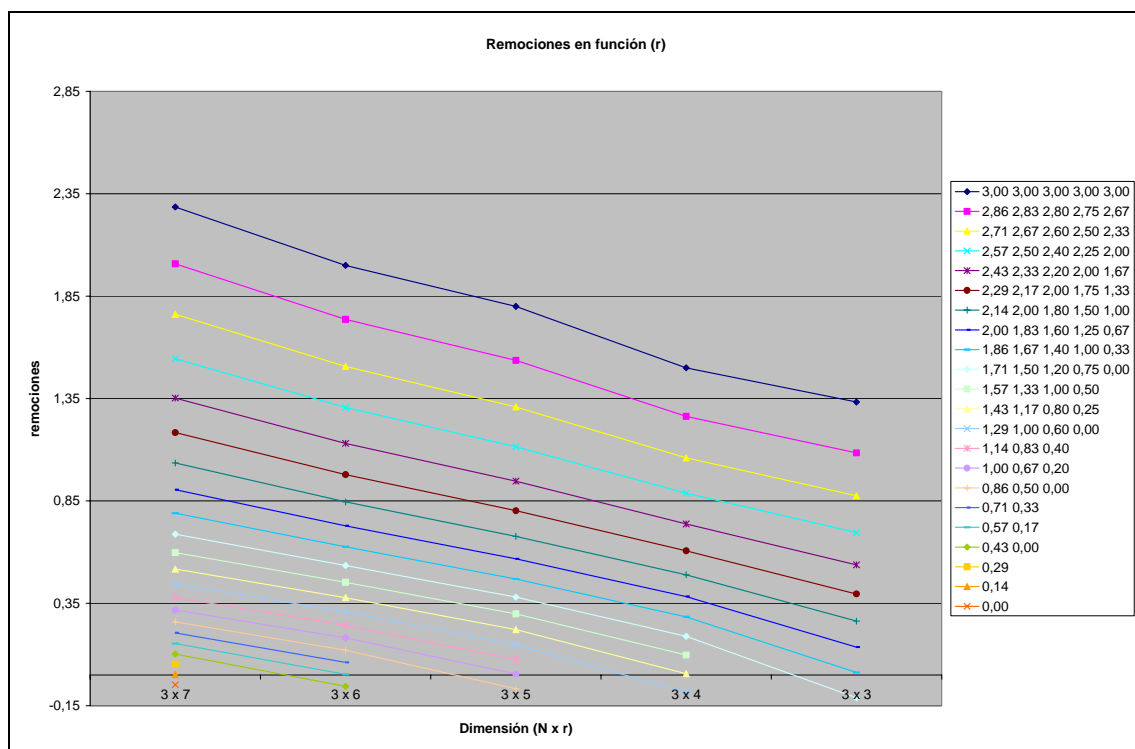


Gráfico 16 Remociones esperadas S_m en función del número de pilas (r) para series de índices de altura equivalentes, siendo $p=N$.

Alternativamente el gráfico 16 analiza el número de remociones en función de (r) parametrizando la función con diferentes series de índices de altura equivalentes. A diferencia del anterior que analizaba el número de remociones en función de (r) pero con el mismo índice de altura.

Son equivalentes en cuanto al número de containers que ya han salido. Por ejemplo en la tercera serie (2,71; 2,67; 2,60; 2,50; 2,33) todos sus índices de altura son equivalentes en cuanto a que corresponden a ocupaciones con (-2) containers de su ocupación máxima, es decir su índice de altura sería $(3-2/r)$, para las siguientes series sería $(3-3/r; 3-4/r; \dots; 0)$. Alternativamente podríamos decir, el índice de altura (2,71)

corresponde a una bahía con 19 containers en una dimensión (3 x 7) de 21 containers, de la misma manera los siguientes elementos de la serie (2,67; 2,60; 2,50; 2,33) corresponden a índices de altura de bahías con 13, 10 y 7 containers para dimensiones de (3 x 5; 3 x 4; 3 x 3) de 15, 12 y 9 containers.

De los dos gráficos anteriores podemos sacar algunas consecuencias:

- Bajando un manto de la altura de paso (p) prácticamente desaparecen las remociones indirectas lo que hace que las remociones en función de (r) sean prácticamente constantes⁸.
- Existe un punto de inflexión en (-5) containers, observando la figura 16 vemos que la sexta serie (-5) corresponde a una línea recta, en cambio las que están por encima tienen un grado de concavidad creciente, e inversamente, las que están por debajo un grado de convexidad creciente.

4.3.6 Análisis de las remociones totales por bahía sin reposición

En los apartados anteriores se han calculado las remociones esperadas para el próximo movimiento para una configuración cerrada (sin huecos) y para una abierta (cualquier índice). En este apartado queremos encontrar una expresión que nos dé el total esperado de remociones hasta vaciar completamente la bahía. Igual que en el apartado anterior el número de remociones es $f(n;N,r,h,p)$.

Integrando la ecuación 4-21 no obtendremos el total de remociones esperadas para mover todos los containers de la bahía. En realidad si integramos esta expresión lo que obtenemos es el total de remociones para vaciar una pila, en consecuencia debemos multiplicar la integral por el número de pilas para obtener el total de remociones de toda la bahía.

$$S_r = r \int_0^N S_m dn$$

Si separamos remociones directas e indirectas,

$$S_r = r \int_0^N Ddn + r \int_0^N Idn$$

Integramos primero las remociones directas,

⁸ Ver gráfico 15 para $n=2$ y $n=1$, en realidad lo que ocurre es que las remociones indirectas tienden a cero a partir del punto de inflexión

$$S_{TD} = r \int_0^N Ddn$$

$$= \frac{N-1}{2} r \int_0^N \frac{n}{N} dn - \frac{N-1}{2} \frac{1}{Nr} r \int_0^N \frac{N-n}{N} dn$$

se sustituye $n = \frac{x}{r} \rightarrow dn = \frac{dx}{r}$

$$S_{TD} = \frac{N-1}{2Nr} \int_0^{Nr} x dx - \frac{N-1}{2} \frac{1}{Nr} \frac{1}{N} \int_0^{Nr} \left(N - \frac{x}{r} \right) dx$$

cambiando límites

$$x = \begin{cases} Nr & \text{para } n = N \\ 0 & \text{para } n = 0 \end{cases}$$

$$S_{TD} = \frac{(N-1)(Nr-1)}{4}$$

Para las indirectas integramos los términos correspondientes multiplicados por el número de pilas,

$$S_{TI} = \left(\frac{r-2}{4} + \frac{1-1^r}{8r} \right) \left(\frac{N}{P} \right)^r r \int_0^N \left(\frac{n}{N} \right)^{P+1} dn$$

igual que con las directas se sustituyen

$$n = \frac{x}{r} \rightarrow dn = \frac{dx}{r}$$

y cambiamos los límites

$$x = \begin{cases} Nr & \text{para } n = N \\ 0 & \text{para } n = 0 \end{cases}$$

$$S_{TI} = \left(\frac{r-2}{4} + \frac{1-1^r}{8r} \right) \left(\frac{N}{P} \right)^r \frac{1}{(Nr)^{P+1}} \int_0^{NR} x^{P+1} dx$$

siendo $\int_0^{NR} x^{p+1} dx = \left| \frac{x^{p+2}}{p+2} \right|_0^{NR} = \frac{(Nr)^{p+2}}{p+2}$

entonces,

$$S_{II} = \left(\frac{r-2}{4} + \frac{1-1^r}{8r} \right) \left(\frac{N}{p} \right)^r \frac{1}{(Nr)^{p+1}} \frac{(Nr)^{p+2}}{p+2}$$

$$= \left(\frac{r-2}{4} + \frac{1-1^r}{8r} \right) \left(\frac{N}{p} \right)^r \frac{(Nr)}{p+2}$$

siendo las remociones totales,

$$S_T = \frac{(N-1)(Nr-1)}{4} + \left(\frac{r-2}{4} + \frac{1-1^r}{8r} \right) \left(\frac{N}{p} \right)^r \frac{(Nr)}{p+2} \quad \text{Ecuación 4-22}$$

Este modelo expresa el número esperado de remociones para vaciar o mover completamente la bahía de containers.

Para terminar este apartado observemos el gráfico siguiente con las remociones totales para vaciar una bahía en función de $N(N; r)$ donde (N) actúa como variable independiente y (r) como parámetro.

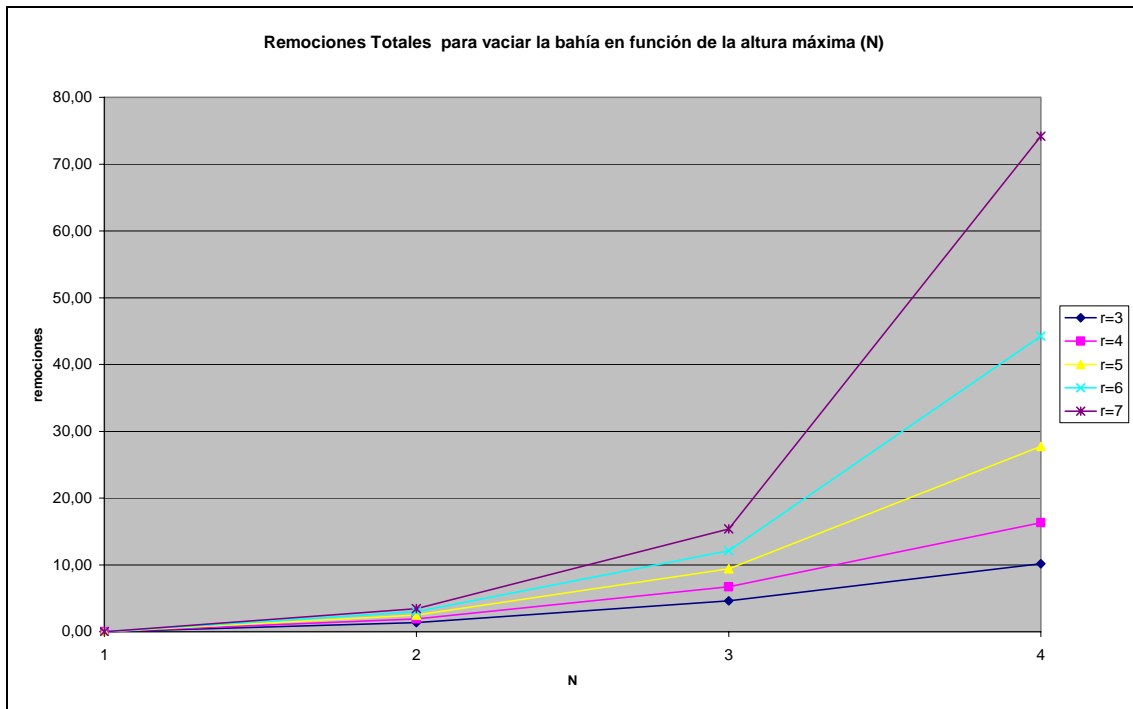


Gráfico 17 Remociones totales para vaciar una bahía. Para diferentes (N;r)

4.3.7 Conclusión

Para concluir con el estudio de las remociones hagamos un análisis de los diferentes errores o desviaciones que se producen entre el modelo analítico o teórico y el empírico.

Primero estudiaremos los errores o desviaciones del número esperado de remociones al realizar el próximo movimiento (error parcial) para posteriormente hacer lo mismo con las remociones totales necesarias para vaciar toda la bahía (error total).

Empecemos con el cálculo del error parcial, es decir la razón entre la diferencia del valor teórico y empírico con el valor empírico, que normalmente expresaremos en porcentaje. Para ello consideraremos la bondad del ajuste mediante el MMRE (magnitud media del error relativo) en valor y absoluto (ABS).

$$MMRE_{ABS} = \frac{1}{Nr} \sum_1^{Nr} \left| \frac{S_n - S'_n}{S_n} \right|$$

Examinemos a continuación las tablas correspondientes a cada una de las dimensiones analizadas con anterioridad. En primer lugar las tablas correspondientes a los errores relativos.

Indice	Remociones teóricas	Remociones empíricas	Diferencia	% MMRE ABS
3,00	1,33	1,33	0,00	0,00
2,67	1,08	0,88	-0,21	23,96
2,33	0,88	0,79	-0,09	11,37
2,00	0,70	0,78	0,08	10,26
1,67	0,54	0,72	0,18	25,15
1,33	0,40	0,57	0,18	31,07
1,00	0,26	0,41	0,15	35,71
0,67	0,14	0,14	0,00	2,54
0,33	0,01	0,00	-0,01	-
0,00	-0,11	0,00	0,11	-
Total	5,34	5,62	0,28	
Promedio	0,59	0,62	0,03	17,51

Tabla 9 Errores para la dimensión 3x3

Indice	Remociones teóricas	Remociones empíricas	Diferencia	% MMRE ABS
3,00	1,50	1,50	0,00	0,00
2,75	1,26	1,18	-0,08	6,85
2,50	1,06	0,97	-0,09	9,18
2,25	0,89	0,91	0,02	2,28
2,00	0,74	0,77	0,03	3,70
1,75	0,61	0,69	0,09	12,30
1,50	0,49	0,58	0,09	15,13
1,25	0,38	0,55	0,17	30,65
1,00	0,28	0,38	0,09	24,53
0,75	0,19	0,22	0,03	12,85
0,50	0,10	0,09	-0,01	6,12
0,25	0,01	0,00	-0,01	-
Total	7,51	7,84	0,33	
Promedio	0,63	0,65	0,03	11,24

Tabla 10 Errores para la dimensión 3x4

Indice	Remociones teóricas	Remociones empíricas	Diferencia	% MMRE ABS
3,00	1,80	1,80	0,00	0,00
2,80	1,54	1,36	-0,18	13,18
2,60	1,31	1,21	-0,10	8,30
2,40	1,11	1,09	-0,03	2,53
2,20	0,95	0,92	-0,03	3,20
2,00	0,80	0,79	-0,02	1,96
1,80	0,68	0,72	0,04	5,49
1,60	0,57	0,62	0,05	8,62
1,40	0,47	0,56	0,09	16,55
1,20	0,38	0,45	0,07	14,91
1,00	0,30	0,34	0,04	11,06
0,80	0,22	0,22	0,00	1,39
0,60	0,15	0,13	-0,02	12,11
0,40	0,08	0,06	-0,02	33,03
0,20	0,00	0,00	0,00	-
Total	10,36	10,27	-0,11	
Promedio	0,69	0,68	-0,01	9,45

Tabla 11 Errores para la dimensión 3x5

Indice	Remociones teóricas	Remociones empíricas	Diferencia	% MMRE ABS
3,00	2,00	2,00	0,00	0,00
2,83	1,74	1,65	-0,09	5,46
2,67	1,51	1,44	-0,07	4,84
2,50	1,31	1,32	0,01	1,11
2,33	1,13	1,08	-0,05	4,46
2,17	0,98	0,95	-0,03	3,01
2,00	0,85	0,81	-0,04	4,78
1,83	0,73	0,73	0,00	0,31
1,67	0,63	0,65	0,02	3,66
1,50	0,53	0,60	0,07	10,66
1,33	0,45	0,52	0,07	12,79
1,17	0,38	0,43	0,05	11,58
1,00	0,31	0,34	0,03	8,91
0,83	0,24	0,25	0,01	4,42
0,67	0,18	0,18	0,00	1,36
0,50	0,12	0,11	-0,01	12,99
0,33	0,06	0,05	-0,01	24,86
0,17	0,00	0,00	0,00	-
Total	13,15	13,11	-0,04	
Promedio	0,73	0,73	0,00	6,78

Tabla 12 Errores para la dimensión 3x6

Indice	Remociones teóricas	Remociones empíricas	Diferencia	% MMRE ABS
3,00	2,29	2,29	0,00	0,00
2,86	2,01	1,85	-0,16	8,53
2,71	1,76	1,68	-0,08	4,61
2,57	1,54	1,51	-0,03	2,01
2,43	1,35	1,28	-0,07	5,73
2,29	1,18	1,09	-0,09	8,23
2,14	1,04	0,97	-0,07	7,22
2,00	0,90	0,83	-0,07	8,45
1,86	0,79	0,74	-0,05	6,57
1,71	0,69	0,65	-0,04	5,84
1,57	0,60	0,59	-0,01	2,14
1,43	0,52	0,52	0,00	0,02
1,29	0,44	0,45	0,01	1,59
1,14	0,38	0,38	0,01	1,37
1,00	0,32	0,32	0,00	0,12
0,86	0,26	0,25	-0,01	2,71
0,71	0,21	0,15	-0,05	33,48
0,57	0,15	0,11	-0,04	40,66
0,43	0,10	0,07	-0,03	49,81
0,29	0,05	0,03	-0,02	62,96
0,14	0,00	0,00	0,00	
Total	16,58	15,76	-0,8	
Promedio	0,79	0,75	-0,04	12,60

Tabla 13 Errores para la dimensión 3x7

Para medir el ajuste en cuanto a los errores totales utilizaremos la Varianza Residual y el Coeficiente de Determinación R^2 . En las dos últimas columnas de la tabla 14 calculamos el error total al vaciar completamente la bahía, siendo (C) el error de la Suma Integral de la ecuación 4-22 y (D) el error de la suma de los elementos discretos índice a índice de la ecuación 4-21.

$$\varepsilon(TOTAL)_{ABS} = \left| \frac{S - S'}{S} \right|$$

Containers	% MMRE ABS	Varianza Residual	Coefficiente de Determinación	% ε (TOTAL) (C)	% ε (TOTAL) (D)
9	17,51	0,01573	0,93410	18,03	6,92
12	11,24	0,00521	0,98160	14,47	5,25
15	9,45	0,00452	0,98920	8,32	0,30
18	6,78	0,00187	0,99610	7,61	0,05
21	12,60	0,00195	0,99690	2,35	4,87

Tabla 14 Para las dimensiones 3x3, 3x4, 3x5, 3x6, 3x7

En la utilización del MMRE observamos que el error relativo máximo (ABS) es 17,51% <25% que es el límite máximo aceptable.

En cuanto al error total vemos que oscila entre 18,03% y 2,35% en (C) y entre 6,92% y 0,05% con elementos Discretos (D).

El coeficiente de determinación oscila entre un 93,41% y 99,69% por encima del límite aceptable que es un 75%.

Por último la varianza residual está muy próxima a cero oscilando entre 0,0157 y 0,00187 en consecuencia podemos considerar que el ajuste es bueno.

También observamos que el ajuste normalmente mejora con el aumento de la dimensión de la bahía.

Por último decir que para una terminal que trabaje con *Straddlecarrier* las dimensiones normales de las bahías varían entre 3x4 y 3x14, si observamos los gráficos 10 a 14 vemos que existe un punto de inflexión que se hace más patente a medida que disminuye el número de pilas. Para los cálculos de explotación operativa podemos considerar que el grado de aproximación es más que suficiente. Normalmente solo se tienen en cuenta las remociones directas⁹ sin considerar el rendimiento de explanada fundamental como veremos para el cálculo de los costes. Cuando se diseña una terminal de containers es necesario el grado máximo de aproximación, considerando el periodo total de la concesión y en su caso el periodo total de explotación antes de trasladarse a otro lugar o de poder redimensionarse en el mismo emplazamiento.

4.4 Primera aproximación al rendimiento medio de explanada

Estamos buscando un modelo que nos dé el rendimiento de toda la explanada en función del índice de altura. Aplicando la ecuación 4-2 el rendimiento para mover el contenedor superior de una pila será {1} ya que no genera ningún movimiento adicional (remoción), el siguiente {1/2} puesto que genera dos movimientos y así sucesivamente

⁹ Existen tablas para el cálculo de remociones Kim (1997), Watanabe (2001).

hasta $\{1/n\}$, finalmente el rendimiento de la pila será la media de estos rendimientos parciales.

Hallando la media aritmética de los rendimientos parciales tendremos la media de la suma enésima de la serie armónica generada por dichos rendimientos,

$$R = \frac{1}{n}(r_1 + r_2 + r_3 + \dots + r_n) \quad \text{Ecuación 4-23}$$

o lo que es lo mismo,

$$R = \frac{1}{n}\left(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \dots + \frac{1}{n}\right) = \frac{1}{n} \sum_{x=1}^n \frac{1}{x} \quad \text{Ecuación 4-24}$$

Que es la primera aproximación al rendimiento medio de la explanada¹⁰. El problema es que como sabemos en realidad pueden existir remociones indirectas y en este sentido no podemos analizar aisladamente una pila. En los apartados siguientes resolveremos este problema teniendo en cuenta el número de pilas y las capacidades máxima y crítica como medida de ocupación de la Terminal.

4.5 Rendimiento de Explanada

Todo lo analizado en los apartados anteriores de este capítulo pretende poder calcular el rendimiento medio de la explanada teniendo en cuenta una altura y un número de pilas medio para cada unidad elemental o bahía. Veamos cual es el rendimiento conjunto de una explanada que tiene todas sus bahías con una dimensión $(n \times r)$, utilizando la ecuación 4-2 tendremos,

$$R = \frac{W_p}{W_p + S},$$

que sería el rendimiento medio para mover un contenedor cualquiera con $E(S)$ remociones esperadas por container movido. En consecuencia si sustituimos S por $E(S)$ tendremos,

$$R = \frac{W_p}{W_p + E(S) \cdot W_p} = \frac{W_p}{W_p \cdot (1 + E(S))} = \frac{1}{1 + E(S)}$$

Si tenemos en cuenta que el número esperado de remociones $E(S)=S_m$ es, según la ecuación 4-21, función del índice de altura (n) y de los parámetros número de pilas (r) , paso de máquina (p) y altura máxima (N) tendremos que el rendimiento esperado de la Terminal será,

¹⁰ Por ejemplo para una pila de altura 3 el rendimiento medio sería $(1+1/2+1/3)/3 = 0,6111$, de la misma forma para una altura igual a 4 sería de 0,5208.

$$R = \frac{1}{1 + S_m} . \text{Ecuación 4-25}$$

Debemos insistir en que este es el rendimiento esperado para una Terminal que tiene (S_m) remociones esperadas por container.

Siendo aplicable a cualquiera de las operativas asociadas a los diferentes tipos de maquinaria de explanada¹¹. La diferencia en función del tipo de maquinaria va implícita en el cálculo de las remociones¹², posteriormente al calcular el rendimiento éste solo depende del número de remociones por calle ó módulo¹³ (bahía). En esta tesis, como ya se ha dicho, nos centramos en operativas con *straddlecarriers*.

¹¹ *Straddle Carriers, Transtainers(RTG y RMG), Chassis, ASC (Automated Stacking Crane), OHBC (Over Head Bridge Crane)* y su respectiva maquinaria auxiliar.

¹² Pequeñas diferencias en el cálculo de las remociones indirectas.

¹³ Calle para Straddle Carrier y módulo para Transtainer.

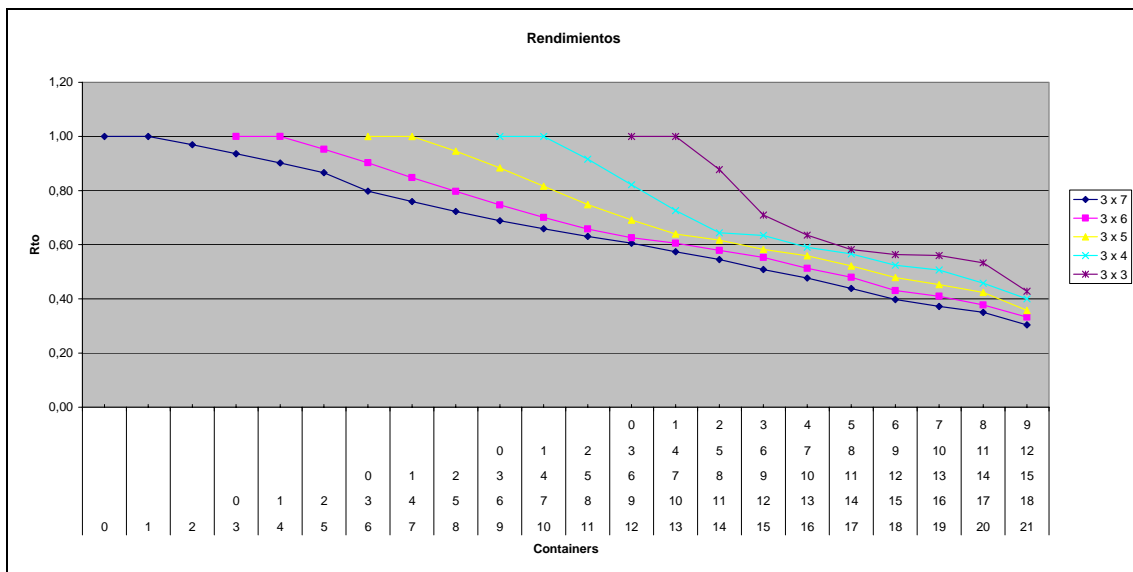


Gráfico 18 Rendimiento según la ocupación (número de containers) para diferentes (r) y altura máxima 3.

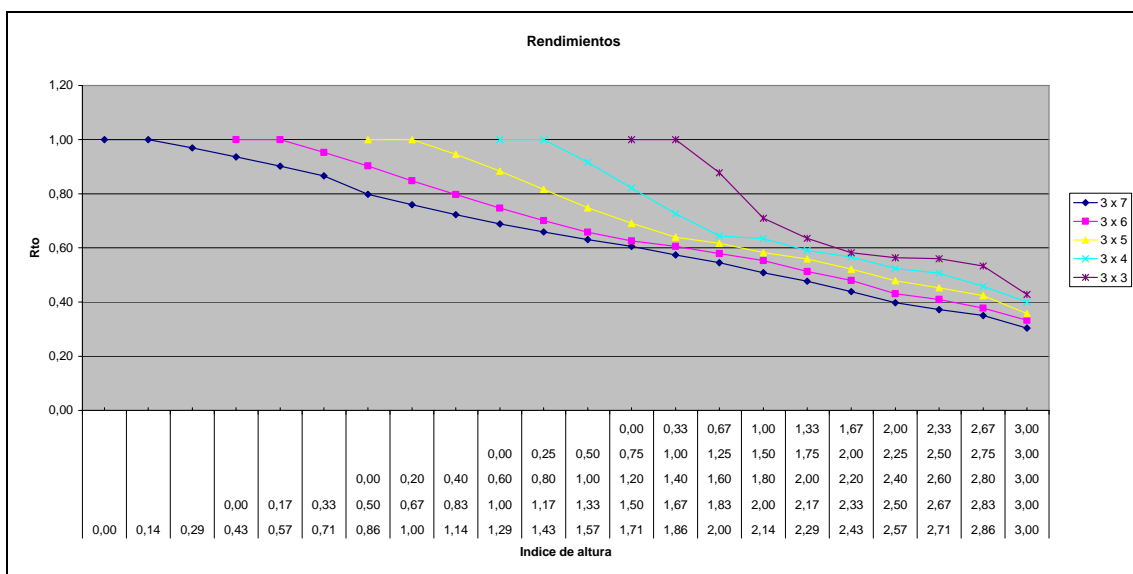


Gráfico 19 Igual que el anterior pero según el índice de altura

En los gráficos anteriores podemos ver como se comportan los rendimientos de explanada en función de la ocupación y de los índices de altura para diferentes (r). Vemos también de nuevo las equivalencias para diferentes índices y números de containers, por ejemplo la serie con número de containers (7;10;13;16;19) en las dimensiones (3x3;3x4;3x5;3x6;3x7) es equivalente con la serie de índices de altura (2,33;2,50;2,60;2,67;2,71) es decir que para la dimensión 3x3 el índice 2,33 se

corresponde con una ocupación de 7 containers, en 3x4 2,50 se corresponde con 10 containers y así sucesivamente. En consecuencia podemos decir que sus ocupaciones son equivalentes, que no es lo mismo que decir que su grado de ocupación sea el mismo¹⁴. Podríamos seguir analizando el rendimiento en función del índice de ocupación pero el objetivo de este capítulo es tener una medida del rendimiento para utilizarlo en capítulos posteriores y fundamentalmente en el balance del sistema.

CONTAINERS	índice	RTO	índice	RTO	índice	RTO	índice	RTO	índice	RTO
	3 x 7		3 x 6		3 x 5		3 x 4		3 x 3	
(N x r)	3,00	0,30	3,00	0,33	3,00	0,36	3,00	0,40	3,00	0,43
(N x r) -1	2,86	0,35	2,83	0,38	2,80	0,42	2,75	0,46	2,67	0,53
(N x r) -2	2,71	0,37	2,67	0,41	2,60	0,45	2,50	0,51	2,33	0,56
(N x r) -3	2,57	0,40	2,50	0,43	2,40	0,48	2,25	0,52	2,00	0,56
(N x r) -4	2,43	0,44	2,33	0,48	2,20	0,52	2,00	0,57	1,67	0,58
(N x r) -5	2,29	0,48	2,17	0,51	2,00	0,56	1,75	0,59	1,33	0,64
(N x r) -6	2,14	0,51	2,00	0,55	1,80	0,58	1,50	0,63	1,00	0,71
(N x r) -7	2,00	0,55	1,83	0,58	1,60	0,62	1,25	0,64	0,67	0,88
(N x r) -8	1,86	0,57	1,67	0,61	1,40	0,64	1,00	0,73	0,33	1,00
(N x r) -9	1,71	0,61	1,50	0,63	1,20	0,69	0,75	0,82	0,00	1,00
(N x r) -10	1,57	0,63	1,33	0,66	1,00	0,75	0,50	0,92		
(N x r) -11	1,43	0,66	1,17	0,70	0,80	0,82	0,25	1,00		
(N x r) -12	1,29	0,69	1,00	0,75	0,60	0,88	0,00	1,00		
(N x r) -13	1,14	0,72	0,83	0,80	0,40	0,95				
(N x r) -14	1,00	0,76	0,67	0,85	0,20	1,00				
(N x r) -15	0,86	0,80	0,50	0,90	0,00	1,00				
(N x r) -16	0,71	0,87	0,33	0,95						
(N x r) -17	0,57	0,90	0,17	1,00						
(N x r) -18	0,43	0,94	0,00	1,00						
(N x r) -19	0,29	0,97								
(N x r) -20	0,14	1,00								
(N x r) -21	0,00	1,00								
PROMEDIO		0,66		0,66		0,67		0,68		0,69

Tabla 15 Rendimientos para las dimensiones 3x7; 3x6; 3x5; 3x4; 3x3

Según la ecuación 4-25 sabemos que el rendimiento medio de una Terminal es,

$$R = \frac{1}{1 + S_m} \rightarrow S_m = \frac{1 - R}{R}$$

además siendo el coste añadido (1 - R) tendremos,

$$C_a = 1 - R \rightarrow S_m = \frac{C_a}{R}, \quad \text{y} \quad \frac{1}{R} = \frac{S_m}{C_a}$$

¹⁴ En el primer caso (7, 3x3, 2,33) → 77,7% de ocupación, en el segundo caso (10, 3x4, 2,50) → 83,3%.

Entonces,

$$W_p + S = \frac{1}{R} W_p$$

Las tablas siguientes muestran las equivalencias entre remociones esperadas, rendimiento y coste añadido. No debemos de confundir coste añadido con remociones, el coste añadido es el porcentaje de remociones por cada 100 movimientos (producidos más remociones), mientras que las remociones esperadas son el número de remociones por cada container producido o en porcentaje el número de remociones por cada cien containers producidos (no todos los movidos).

Indice	Containers	Sm	Rto	Ca
3,00	21	2,29	0,30	0,70
2,86	20	2,01	0,35	0,65
2,71	19	1,76	0,37	0,63
2,57	18	1,54	0,40	0,60
2,43	17	1,35	0,44	0,56
2,29	16	1,18	0,48	0,52
2,14	15	1,04	0,51	0,49
2,00	14	0,9	0,55	0,45
1,86	13	0,79	0,57	0,43
1,71	12	0,69	0,61	0,39
1,57	11	0,60	0,63	0,37
1,43	10	0,52	0,66	0,34
1,29	9	0,44	0,69	0,31
1,14	8	0,38	0,72	0,28
1,00	7	0,32	0,76	0,24
0,86	6	0,26	0,80	0,20
0,71	5	0,21	0,87	0,13
0,57	4	0,15	0,90	0,10
0,43	3	0,10	0,94	0,06
0,29	2	0,05	0,97	0,03
0,14	1	0,00	1,00	0,00
Total		16,58		
Promedio		0,79	0,64	0,36

Tabla 16 Remociones esperadas, Rendimiento y Coste Añadido en una pila de 3x7 containers.

Indice	Containers	Sm	Rto	Ca
3,00	18	2,00	0,33	0,67
2,83	17	1,74	0,37	0,63
2,67	16	1,51	0,40	0,60
2,50	15	1,31	0,43	0,57
2,33	14	1,13	0,47	0,53
2,17	13	0,98	0,51	0,49
2,00	12	0,85	0,54	0,46
1,83	11	0,73	0,58	0,42
1,67	10	0,63	0,61	0,39
1,50	9	0,53	0,65	0,35
1,33	8	0,45	0,69	0,31
1,17	7	0,38	0,73	0,27
1,00	6	0,31	0,76	0,24
0,83	5	0,24	0,80	0,20
0,67	4	0,18	0,85	0,15
0,50	3	0,12	0,89	0,11
0,33	2	0,06	0,94	0,06
0,17	1	0,00	1,00	0,00
Total		13,15		
Promedio		0,73	0,64	0,36

Tabla 17 Remociones, Rendimiento y Coste Añadido de 3x6.

Indice	Containers	Sm	Rto	Ca
3,00	15	1,80	0,36	0,64
2,80	14	1,54	0,39	0,61
2,60	13	1,31	0,43	0,57
2,40	12	1,11	0,47	0,53
2,20	11	0,95	0,51	0,49
2,00	10	0,80	0,55	0,45
1,80	9	0,68	0,60	0,40
1,60	8	0,57	0,64	0,36
1,40	7	0,47	0,68	0,32
1,20	6	0,38	0,72	0,28
1,00	5	0,30	0,77	0,23
0,80	4	0,22	0,82	0,18
0,60	3	0,15	0,87	0,13
0,40	2	0,08	0,93	0,07
0,20	1	0,00	1,00	0,00
Total		10,36		
Promedio		0,69	0,65	0,35

Tabla 18 Remociones, Rendimiento y Coste Añadido de 3x5.

Indice	Containers	Sm	Rto	Ca
3,00	12	1,50	0,40	0,60
2,75	11	1,26	0,44	0,56
2,50	10	1,06	0,49	0,51
2,25	9	0,89	0,53	0,47
2,00	8	0,74	0,58	0,42
1,75	7	0,61	0,62	0,38
1,50	6	0,49	0,67	0,33
1,25	5	0,38	0,72	0,28
1,00	4	0,28	0,78	0,22
0,75	3	0,19	0,84	0,16
0,50	2	0,10	0,91	0,09
0,25	1	0,01	0,99	0,01
Total		7,51		
Promedio		0,63	0,66	0,34

Tabla 19 Remociones, Rendimiento y Coste Añadido de 3x4.

Indice	Containers	Sm	Rto	Ca
3,00	9	1,33	0,43	0,57
2,67	8	1,08	0,48	0,52
2,33	7	0,88	0,53	0,47
2,00	6	0,70	0,59	0,41
1,67	5	0,54	0,65	0,35
1,33	4	0,40	0,72	0,28
1,00	3	0,26	0,79	0,21
0,67	2	0,14	0,88	0,12
0,33	1	0,01	0,99	0,01
Total		5,34		
Promedio		0,59	0,67	0,33

Tabla 20 Remociones, Rendimiento y Coste Añadido de 3x3 .

4.5.1 Ocupación crítica

La capacidad física máxima corregida por los “huecos de remoción” necesarios se define como la ocupación o capacidad crítica. Esto es, si la explanada en su conjunto está al máximo índice de altura no habrá huecos para realizar remociones y la operativa se “parará” por falta de espacio.

Empíricamente¹ se reserva una cantidad de huecos igual a la altura máxima menos uno ($N-1$) en cada bahía con objeto de que en el peor de los casos podamos sacar el container estibado a primera altura, es decir el último container de la pila.

No obstante cuando trabajamos con una altura (N) igual al paso de máquina (p) deberemos añadir a la cantidad anterior un número igual a la mitad del número de pilas menos uno². Según sea el paso de máquina el número de huecos necesario será,

para $p > N$

$$h = N - 1$$

para $p = N$; 2 casos

Ecuación 4-26

a) bahía impar

$$h = N - 1 + \frac{r - 1}{2}$$

b) para una bahía par

$$h = N - 1 + \frac{r - 2}{2}$$

Por ejemplo para una bahía de 3x5 necesitaríamos en el peor de los casos 4 huecos de remoción y para una de 3x6 también serían 4 huecos.

En el cómputo total de una explanada el porcentaje de ocupación depende de la altura máxima, del número de pilas, del paso de máquina y de la proporción³ entre 20' y 40' pies. En el ejemplo anterior para una bahía de 3x5 estamos hablando de una ocupación crítica del 73% y para una de 3x6 del 78%. Añadiendo una altura más es decir para 4x5 y 4x6 tendremos unas ocupaciones críticas del 75% y del 79% respectivamente.

Esta hipótesis es generalizable a todos los bloques y bahías de la explanada de manera que si suponemos que tenemos todas las bahías con una dimensión de 3x14 para los

¹ En base a datos empíricos se ha determinado que la reserva de stock óptima es igual al número de remociones necesarias para mover el container situado en el primer manto del centro de la bahía, dado un nivel de ocupación máximo.

² Es decir las remociones indirectas necesarias para sacar el container situado en las peores condiciones.

³ Puede haber otras longitudes 45' 30' etc.

containers de veinte pies (20') y de 3x7 para los de cuarenta pies (40') con un paso de máquina de (2+1) tendremos unas capacidades u ocupaciones⁴ críticas de,

$$h = N - 1 + \frac{r - 1}{2} \rightarrow C_{c(3 \times 7)} = \frac{21 - 5}{21} = 76,19\%$$

para los 40' donde $h = 5$

$$h = N - 1 + \frac{r - 2}{2} \rightarrow C_{c(3 \times 14)} = \frac{42 - 8}{42} = 80,95\%$$

para los 20' donde $h = 8$

Los porcentajes anteriores se refieren a containers⁵, la ocupación crítica para los 40' es del 76,19% y para los 20' es del 80,95%. ¿Podemos decir que esas ocupaciones críticas son equivalentes?

Ciertamente que las capacidades físicas si que son equivalentes⁶ pero no ocurre lo mismo con las ocupaciones críticas debido a que al aumentar el número de subdivisiones (pilas) también aumenta la capacidad crítica como hemos visto en los párrafos anteriores.

En la tabla y gráfico siguientes observamos que las diferencias toman valores alternativos (1, 2, 1, 2...), además en la tabla 4-22 observamos que, aunque es cierto que el grado de ocupación crítica sube con el número de pilas, nos encontramos con que al pasar de un número par al impar superior el porcentaje decrece⁷ ligeramente. Por ejemplo al pasar de 3x6 a 3x7 las ocupaciones críticas son de 78% y 76% respectivamente. En general y a excepción de esta salvedad podemos decir que la tendencia es a crecer con el número de pilas y por supuesto con el número de mantos o altura máxima.

⁴ Considerando que cada hueco es un container, en consecuencia un hueco de 40' equivale a dos TEUS y un hueco de 20' a un TEU

⁵ No a TEUs.

⁶ Transformando a TEUS tendremos que la bahía de 20' tiene una capacidad máxima de $14 \times 3 = 42$ TEUS, y la de 40' tiene $7 \times 3 = 21$ containers de 40' que transformados en TEUS serán $21 \times 2 = 42$, es decir la capacidad máxima de ambas calles o bahías es igual a 42 TEUS.

⁷ Esta diferencia en porcentaje se suaviza a medida que aumenta la altura y el número de pilas máximo.

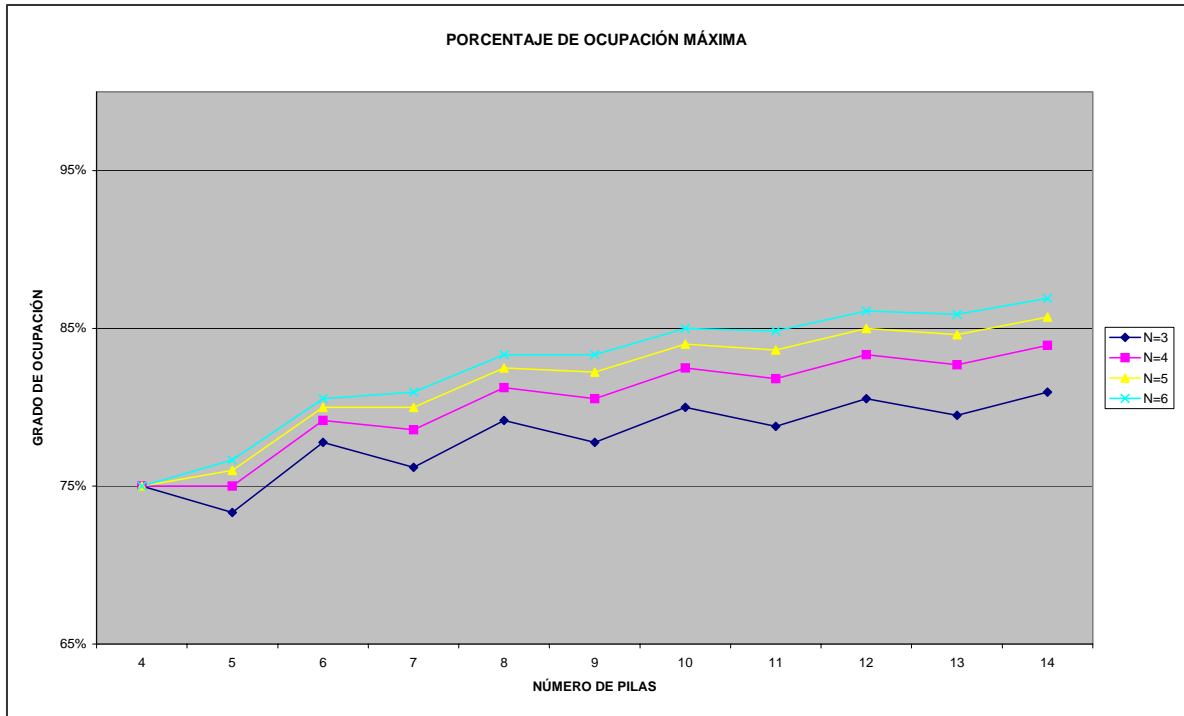


Gráfico 20 Grado de ocupación crítica en función del número de pilas para diferentes alturas máximas (N)

Pilas (40')x3	TEUS ocupación crítica	Pilas (20')x3	TEUS ocupación crítica	DIF	TEUS ocupación máxima
Altura máxima (N) =3; paso de máquina = (2+1)					
4	18,00	8	19,00	1,00	=24
5	22,00	10	24,00	2,00	=30
6	28,00	12	29,00	1,00	=36
7	32,00	14	34,00	2,00	=42

Tabla 21 Diferencias de ocupación crítica en un mismo espacio para diferentes subdivisiones (20' y 40's)

Cuando el grado de ocupación llega a los umbrales de la ocupación crítica podemos considerar que la explanada se comporta como una máquina que deja de funcionar gradualmente cayendo el rendimiento casi en picado hasta que la operativa se para sin remedio cuando ya no quedan huecos libres en ningún bloque.

Para entender lo que sucede realmente pensemos que cuando se supera esta capacidad crítica en los diferentes bloques las distancias que tienen que recorrer las máquinas

aumentan de manera más que proporcional con respecto a la ocupación, primero deben ir al bloque contiguo después dos bloques más lejos y al final puede darse el caso de tener que ir a situar el container remocionado a una distancia diametralmente opuesta a la ubicación donde se encuentra el container que debemos cargar, por último al no quedar huecos no se puede cargar o descargar el container buscado y la operativa se detiene.

En cualquier caso recordemos que seguimos trabajando con la premisa inicial de que los containers se cargan de forma aleatoria, en el capítulo correspondiente al balance analizaremos el rendimiento en función de los distintos flujos o estados, es decir la importación, exportación, trasbordos y vacíos, donde por ejemplo observaremos que los containers de exportación al estar agrupados en bahías homogéneas⁸ teóricamente no requerirán remociones para ser cargados en buque⁹.

Podemos considerar que una terminal trabaja con una misma altura máxima (N) en todos sus bloques, entonces el grado de ocupación crítica depende del número de pilas (r) que es un parámetro con un alto grado de homogeneidad¹⁰ para 20' y 40' pies, es decir la mayoría de las bahías tendrán una longitud normalizada aunque por restricciones de forma, terreno y diseño algunas tendrán longitudes distintas. En la tabla siguiente podemos ver las capacidades críticas correspondientes en función del número de pilas para diferentes alturas máximas (N) a las que trabaje la Terminal.

En resumen, tendremos una misma altura máxima y la misma longitud de bahía, variando según la longitud de los containers, por ejemplo 7 pilas para los 40's y 14 pilas para los 20's, pero con la misma longitud física de calle.

Altura Pilas	N=3	N=4	N=5	N=6
4	75%	75%	75%	75%
5	73%	75%	76%	77%
6	78%	79%	80%	81%
7	76%	79%	80%	81%
8	79%	81%	83%	83%
9	78%	81%	82%	83%
10	80%	83%	84%	85%
11	79%	82%	84%	85%
12	81%	83%	85%	86%
13	79%	83%	85%	86%
14	81%	84%	86%	87%

Tabla 22 Ocupaciones críticas en función de la dimensión de la bahía

⁸ Mismo buque, mismo puerto de descarga, mismo peso y longitud, es decir son equivalentes.

⁹ En realidad existen excepciones por ejemplo cancelaciones, cambios de destino de última hora, IMOS, etc.

¹⁰ Solo varía en función de la longitud del container, por ejemplo 7 containers para 40' y 14 para 20'.

Como se puede observar en el gráfico siguiente el rendimiento cae en picado (linealmente) desde la capacidad crítica hasta la capacidad física máxima.

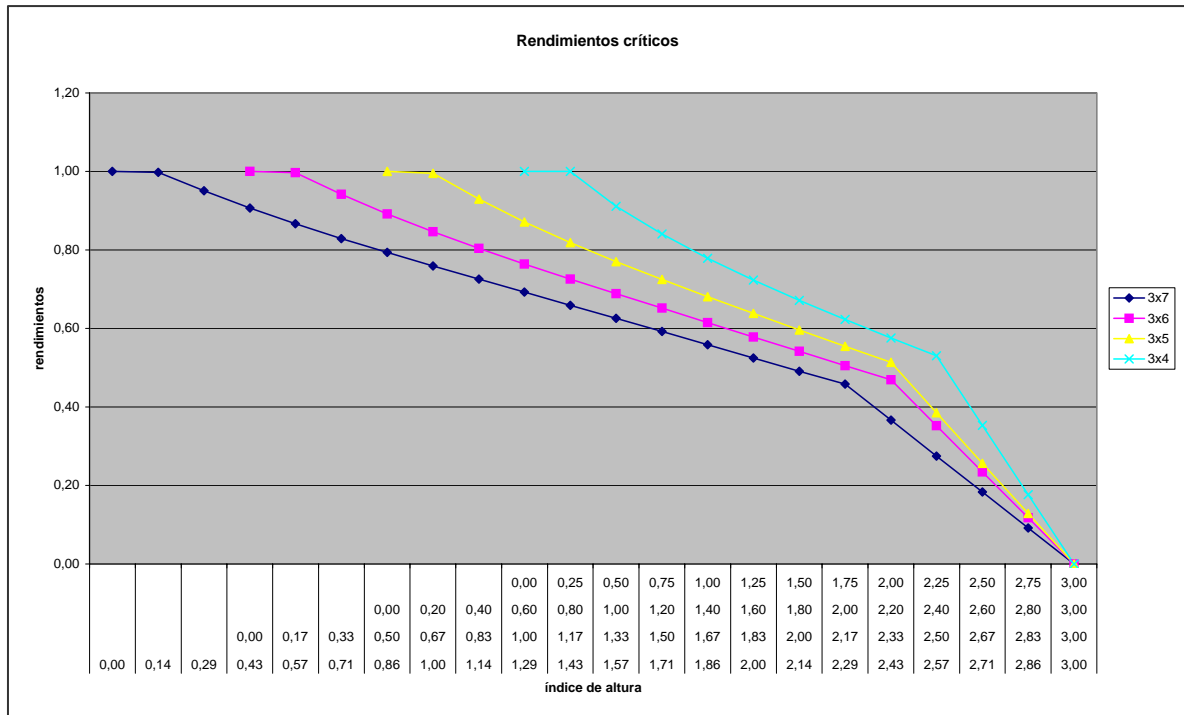


Gráfico 21 Rendimientos corregidos por ocupación crítica para N=3 y número de pilas igual a 4, 5, 6 ó 7 siendo el paso de máquina igual a (N).

Suponemos que a partir de la ocupación crítica el rendimiento es una función lineal¹¹ decreciente del índice de ocupación¹² ($n/N=I$) donde la reserva de ocupación (I_c-I) y rendimiento críticos (R_c) forman los catetos contiguo y opuesto (Figura 25) respectivamente. En consecuencia la tangente del ángulo formado por la función lineal y la recta de abscisas (índice de ocupación) será,

$$tg\theta = \frac{R_c}{I_c - I},$$

siendo el rendimiento corregido,

$$R_c = tg\theta(I_c - I)$$

Ecuación 4-27

para cualquier índice de ocupación $I_x \geq I_c$

¹¹ Podemos tener en cuenta otras consideraciones, como una exponencial negativa, pero es un tema que para no extendernos en demasía y por concisión dejamos abierta para posteriores estudios.

¹² En el gráfico está en función del índice de altura, aunque si dividimos cada índice de altura por la altura máxima (N) obtendremos el grado o índice de ocupación.

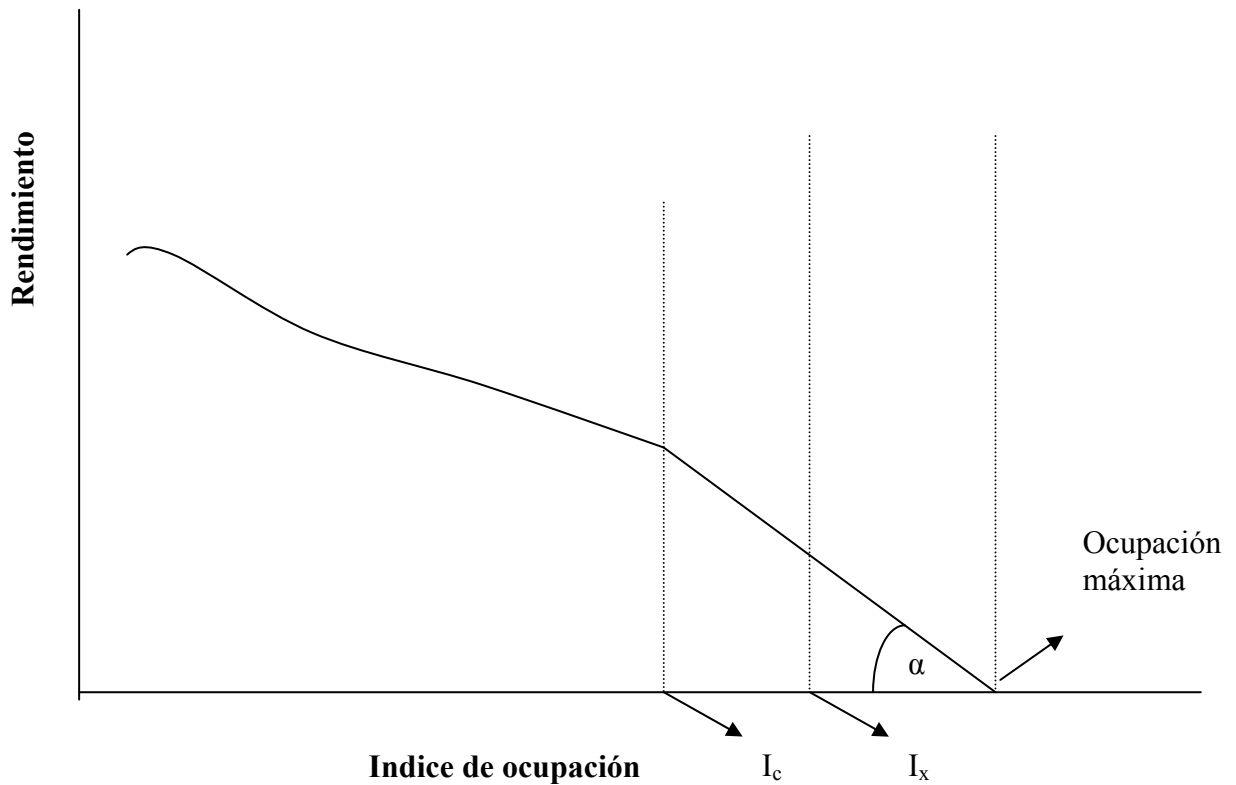


Figura 25 Caída del rendimiento a partir de la ocupación crítica.

En las ecuaciones 4-30 hallaremos el número de huecos de remoción según sean los parámetros de altura máxima, paso de máquina y número de pilas. Para hallar la ocupación crítica nos falta ponderar dichas fórmulas por la longitud de los containers y la proporción de los diferentes pasos de máquina.

Supongamos por ejemplo que tenemos 10.000 TEUS en explanada de los cuales 3125 son de 40' y 3750 son de 20' entonces tenemos que ponderar las ocupaciones críticas en función del número de calles ocupadas por containers de 20' y 40' es decir, para 14 y 7 pilas respectivamente.

Igualmente sucede con los pasos de máquina, podemos tener 40 *Vancarriers* (V_c) de los cuales 10 sean de paso (3+1) y los 30 restantes de (2+1). En el primer caso $p > N$ y en el segundo $p = N$ utilizando un número de huecos distinto en cada caso.

Una vez conocida la ocupación crítica, corregida por los coeficientes de paso de máquina y longitud de los containers, aplicaremos la corrección correspondiente al rendimiento de explanada.

Recalculemos la ocupación crítica pero teniendo en cuenta esta vez los coeficientes de longitud de container y paso de máquina. Calculamos primero la corrección según la relación entre TEUs y el total de containers,

$a =$ containers de 20' y $b =$ containers de 40'

$$\alpha = \frac{a + (b \times 2)}{a + b}$$

El coeficiente de conversión nos indica la relación entre TEUS y containers. Entonces la proporción de containers de 20' y 40' pies será,

$$\lambda_a = 2 - \alpha$$

$$\lambda_b = \alpha - 1$$

Ecuación 4-28

Verificando,

$$\lambda_a + \lambda_b = 1$$

siendo el total de containers,

$$c = \frac{\text{TEUS}}{\alpha}$$

Para calcular el índice de paso de máquina consideramos,

X_1 el número de máquinas con paso = N y X_2 con paso = $N + 1$, entonces,

$$\beta_N = \frac{X_1}{X_1 + X_2}$$

índice de paso para máquinas con altura N ,

$$\beta_{N+1} = \frac{X_2}{X_1 + X_2}$$

índice de paso para máquinas con altura $N + 1$.

Entonces aplicando los índices de paso de máquina al cálculo del número de huecos tendremos,

$$h_l = (N - 1)\beta_{N+1} + \left(N - 1 + \frac{r - d}{2}\right)\beta_N$$

Ecuación 4-29

la ecuación anterior nos dará los huecos en función de la altura de las máquinas y del número de pilas por calle, para las diferentes longitudes l de containers y siendo d (1 ó 2) una constante en función de que el número de pilas sea par o impar.

Ahora podemos calcular la ocupación crítica teniendo en cuenta las longitudes de los containers y paso de máquina, entonces la ocupación crítica vendrá dada por la media ponderada,

$$O_C = \sum_1^l \frac{O_{\max l} - h_l}{O_{\max l}} \lambda_l$$

Ecuación 4-30

La ecuación anterior calcula la ocupación crítica conjunta para (l) longitudes de containers (20' y 40' pies en este caso) siendo (λ_i) su coeficiente de ocupación, teniendo en cuenta además los diferentes coeficientes (β_N) de paso de máquina.

Utilizando las ecuaciones 4-25, 4-27 y 4-30 hallamos el rendimiento, rendimiento corregido y ocupación crítica. La tabla siguiente muestra los rendimientos corregidos (R_{cg}) para diferentes dimensiones con altura máxima $N=3$.

Dimensión	3x7		Dimensión	3x6		Dimensión	3x5		Dimensión	3x4	
tangente	-		tangente	-		tangente	-		tangente	-	
	1,923			2,111			1,926			2,119	
R_c	0,46		R_c	0,47		R_c	0,51		R_c	0,53	
O_c	76%		O_c	78%		O_c	73%		O_c	75%	
índice	R_c	R	índice	R_c	R	índice	R_c	R	índice	R_c	R
3,00	0,00	0,30	3,00	0,00	0,33	3,00	0,00	0,36	3,00	0,00	0,40
2,86	0,09	0,33	2,83	0,12	0,37	2,80	0,13	0,39	2,75	0,18	0,44
2,71	0,18	0,36	2,67	0,23	0,40	2,60	0,26	0,43	2,50	0,35	0,49
2,57	0,27	0,39	2,50	0,35	0,43	2,40	0,39	0,47	2,25	0,53	0,53
2,43	0,37	0,43	2,33	0,47	0,47	2,20	0,51	0,51	2,00	0,58	0,58
2,29	0,46	0,46	2,17	0,51	0,51	2,00	0,55	0,55	1,75	0,62	0,62
2,14	0,49	0,49	2,00	0,54	0,54	1,80	0,60	0,60	1,50	0,67	0,67
2,00	0,53	0,53	1,83	0,58	0,58	1,60	0,64	0,64	1,25	0,72	0,72
1,86	0,56	0,56	1,67	0,61	0,61	1,40	0,68	0,68	1,00	0,78	0,78
1,71	0,59	0,59	1,50	0,65	0,65	1,20	0,72	0,72	0,75	0,84	0,84
1,57	0,63	0,63	1,33	0,69	0,69	1,00	0,77	0,77	0,50	0,91	0,91
1,43	0,66	0,66	1,17	0,73	0,73	0,80	0,82	0,82	0,25	1,00	1,00
1,29	0,69	0,69	1,00	0,76	0,76	0,60	0,87	0,87	0,00	1,00	1,00
1,14	0,73	0,73	0,83	0,80	0,80	0,40	0,93	0,93			
1,00	0,76	0,76	0,67	0,85	0,85	0,20	1,00	1,00			
0,86	0,79	0,79	0,50	0,89	0,89	0,00	1,00	1,00			
0,71	0,83	0,83	0,33	0,94	0,94						
0,57	0,87	0,87	0,17	1,00	1,00						
0,43	0,91	0,91	0,00	1,00	1,00						
0,29	0,95	0,95									
0,14	1,00	1,00									
0,00	1,00	1,00									

Tabla 23 Rendimientos corregidos por nivel de ocupación crítica para $p=N$

4.5.2 Cálculo de la ocupación crítica. Considerando los coeficientes de paso de máquina y longitud de container

Supongamos una Terminal A con layout para *straddlecarrier* de pasos (2+1) y (3+1) una capacidad física máxima de 10.000 TEUS, un coeficiente de conversión $\alpha = 1,56$

siendo el total de *straddlecarriers* (VC's) de 40 unidades con la siguiente distribución, 10 x (3+1) y 30 x (2+1), calculemos su ocupación ó capacidad crítica:

Primero calculamos los coeficientes de ocupación para 20' y 40' pies, utilizando las fórmulas 4-29,

$$\lambda_a = 2 - \alpha \rightarrow \lambda_b = 2 - 1,56 = 0,44$$

$$\lambda_b = \alpha - 1 \rightarrow \lambda_a = 1,56 - 1 = 0,56$$

estos son los coeficientes para 20' y 40' pies respectivamente, para el cálculo de los huecos de remoción nos faltan los índices de paso de máquina,

siendo $X_1 = 30$ el número de máquinas con paso = N y $X_2 = 10$ con paso = N + 1 entonces,

$$\beta_N = \frac{X_1}{X_1 + X_2} = \frac{30}{30 + 10} = 0,75$$

índice de paso para máquinas con altura N

$$\beta_{N+1} = \frac{X_2}{X_1 + X_2} = \frac{10}{30 + 10} = 0,25$$

índice de paso para máquinas con altura N + 1

con estos coeficientes ya podemos calcular el número de huecos utilizando la ecuación 4-31,

$$h_i = (N - 1)\beta_{N+1} + \left(N - 1 + \frac{r - d}{2}\right)\beta_N$$

para los 20' tendremos,

$$h_{20'} = 2 \times 0,25 + \left(2 + \frac{14 - 2}{2}\right) \times 0,75 = 6,5$$

y para los 40' pies,

$$h_{40'} = 2 \times 0,25 + \left(2 + \frac{7 - 1}{2}\right) \times 0,75 = 4,25$$

ahora ya tenemos todas las correcciones para calcular la Capacidad Crítica¹³, aplicando la ecuación 4-34 tendremos,

$$O_c = \frac{42 - 6,5}{42} 0,44 + \frac{21 - 4,25}{21} 0,56 = 81.86\%$$

Esta es la ocupación crítica combinada para 20' y 40' pies. La tabla siguiente muestra los valores de la ocupación crítica para diferentes valores de α y β .

				a	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
				b	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0

¹³ Consideramos como ocupación máxima de 20' y 40' a 42 y 21 containers por calle, equivalente a la ocupación máxima de 20' y 40' respectivamente.

ESTUDIO DEL RENDIMIENTO

h(1)	h(2)	N+1	N	Alfa Beta		2	1,9	1,8	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1	1
8,00	5,00	0	30	0,00	1,00	76,2%	76,7%	77,1%	77,6%	78,1%	78,6%	79,0%	79,5%	80,0%	80,5%	81,0%
7,80	4,90	1	29	0,03	0,97	76,7%	77,1%	77,6%	78,1%	78,6%	79,0%	79,5%	80,0%	80,5%	81,0%	81,4%
7,60	4,80	2	28	0,07	0,93	77,1%	77,6%	78,1%	78,6%	79,0%	79,5%	80,0%	80,5%	81,0%	81,4%	81,9%
7,40	4,70	3	27	0,10	0,90	77,6%	78,1%	78,6%	79,0%	79,5%	80,0%	80,5%	81,0%	81,4%	81,9%	82,4%
7,20	4,60	4	26	0,13	0,87	78,1%	78,6%	79,0%	79,5%	80,0%	80,5%	81,0%	81,4%	81,9%	82,4%	82,9%
7,00	4,50	5	25	0,17	0,83	78,6%	79,0%	79,5%	80,0%	80,5%	81,0%	81,4%	81,9%	82,4%	82,9%	83,3%
6,80	4,40	6	24	0,20	0,80	79,0%	79,5%	80,0%	80,5%	81,0%	81,4%	81,9%	82,4%	82,9%	83,3%	83,8%
6,60	4,30	7	23	0,23	0,77	79,5%	80,0%	80,5%	81,0%	81,4%	81,9%	82,4%	82,9%	83,3%	83,8%	84,3%
6,40	4,20	8	22	0,27	0,73	80,0%	80,5%	81,0%	81,4%	81,9%	82,4%	82,9%	83,3%	83,8%	84,3%	84,8%
6,20	4,10	9	21	0,30	0,70	80,5%	81,0%	81,4%	81,9%	82,4%	82,9%	83,3%	83,8%	84,3%	84,8%	85,2%
6,00	4,00	10	20	0,33	0,67	81,0%	81,4%	81,9%	82,4%	82,9%	83,3%	83,8%	84,3%	84,8%	85,2%	85,7%
5,80	3,90	11	19	0,37	0,63	81,4%	81,9%	82,4%	82,9%	83,3%	83,8%	84,3%	84,8%	85,2%	85,7%	86,2%
5,60	3,80	12	18	0,40	0,60	81,9%	82,4%	82,9%	83,3%	83,8%	84,3%	84,8%	85,2%	85,7%	86,2%	86,7%
5,40	3,70	13	17	0,43	0,57	82,4%	82,9%	83,3%	83,8%	84,3%	84,8%	85,2%	85,7%	86,2%	86,7%	87,1%
5,20	3,60	14	16	0,47	0,53	82,9%	83,3%	83,8%	84,3%	84,8%	85,2%	85,7%	86,2%	86,7%	87,1%	87,6%
5,00	3,50	15	15	0,50	0,50	83,3%	83,8%	84,3%	84,8%	85,2%	85,7%	86,2%	86,7%	87,1%	87,6%	88,1%
4,80	3,40	16	14	0,53	0,47	83,8%	84,3%	84,8%	85,2%	85,7%	86,2%	86,7%	87,1%	87,6%	88,1%	88,6%
4,60	3,30	17	13	0,57	0,43	84,3%	84,8%	85,2%	85,7%	86,2%	86,7%	87,1%	87,6%	88,1%	88,6%	89,0%
4,40	3,20	18	12	0,60	0,40	84,8%	85,2%	85,7%	86,2%	86,7%	87,1%	87,6%	88,1%	88,6%	89,0%	89,5%
4,20	3,10	19	11	0,63	0,37	85,2%	85,7%	86,2%	86,7%	87,1%	87,6%	88,1%	88,6%	89,0%	89,5%	90,0%
4,00	3,00	20	10	0,67	0,33	85,7%	86,2%	86,7%	87,1%	87,6%	88,1%	88,6%	89,0%	89,5%	90,0%	90,5%
3,80	2,90	21	9	0,70	0,30	86,2%	86,7%	87,1%	87,6%	88,1%	88,6%	89,0%	89,5%	90,0%	90,5%	91,0%
3,60	2,80	22	8	0,73	0,27	86,7%	87,1%	87,6%	88,1%	88,6%	89,0%	89,5%	90,0%	90,5%	91,0%	91,4%
3,40	2,70	23	7	0,77	0,23	87,1%	87,6%	88,1%	88,6%	89,0%	89,5%	90,0%	90,5%	91,0%	91,4%	91,9%
3,20	2,60	24	6	0,80	0,20	87,6%	88,1%	88,6%	89,0%	89,5%	90,0%	90,5%	91,0%	91,4%	91,9%	92,4%
3,00	2,50	25	5	0,83	0,17	88,1%	88,6%	89,0%	89,5%	90,0%	90,5%	91,0%	91,4%	91,9%	92,4%	92,9%
2,80	2,40	26	4	0,87	0,13	88,6%	89,0%	89,5%	90,0%	90,5%	91,0%	91,4%	91,9%	92,4%	92,9%	93,3%
2,60	2,30	27	3	0,90	0,10	89,0%	89,5%	90,0%	90,5%	91,0%	91,4%	91,9%	92,4%	92,9%	93,3%	93,8%
2,40	2,20	28	2	0,93	0,07	89,5%	90,0%	90,5%	91,0%	91,4%	91,9%	92,4%	92,9%	93,3%	93,8%	94,3%
2,20	2,10	29	1	0,97	0,03	90,0%	90,5%	91,0%	91,4%	91,9%	92,4%	92,9%	93,3%	93,8%	94,3%	94,8%
2,00	2,00	30	0	1,00	0,00	90,5%	91,0%	91,4%	91,9%	92,4%	92,9%	93,3%	93,8%	94,3%	94,8%	95,2%

Tabla 24 Ocupación Crítica en función de los coeficientes de paso y ocupación para una combinación 3X14 (20') y 3X7 (40').

4.5.3 Rendimiento combinado. Según número de pilas de 20' y 40' pies

Pero para calcular el rendimiento de toda la explanada necesitamos conocer el número de pilas por calle, que como sabemos varía en función de la longitud de los containers, pudiéndose calcular de dos modos:

1. Hallando el rendimiento de cada una de las longitudes (20' y 40' pies) y calculando su media ponderada según el número de containers.
2. Calculando el número de pilas combinado, interpolando mediante los coeficientes λ de 20' y 40' pies y a partir de aquí hallar el rendimiento.

Utilizaremos el segundo método por su mayor simplicidad operativa. En las terminales normalmente utilizamos el índice de altura combinado por el mismo motivo, de otro modo sería laborioso recalculer el índice de las diferentes longitudes y a partir de ahí los rendimientos de las diferentes longitudes para luego a su vez ponderarlos para hallar el rendimiento combinado.

Siguiendo con el ejemplo del apartado anterior, para una ocupación crítica combinada del 81,86% con una altura máxima $N=3$ el índice de altura será:

$$0,8186 \times 3 = 2,4558$$

El número de pilas equivalente teniendo en cuenta los coeficientes y las longitudes de pila para 20' y 40' pies será,

$$14\lambda_a + 7\lambda_b = 10,08$$

utilizando

$$r_a\lambda_a + r_b\lambda_b = r_c$$

este es el número de pilas combinado.

Utilizando este número de pilas podemos calcular las remociones y el rendimiento correspondiente para los diferentes índices de ocupación de una terminal con unos coeficientes de ocupación y paso de máquina dados¹⁴.

$$R_c = \begin{cases} \frac{1}{1 - S_m} \rightarrow \forall n < n_c \\ tg \alpha (O_x - 1) \rightarrow \forall n \geq n_c \end{cases}$$

Este es el rendimiento corregido, donde podemos utilizar cualquiera de los dos procedimientos de cálculo, siendo O_x la ocupación actual y n_c el índice de altura crítico de explanada.

¹⁴ Consideramos la capacidad máxima, los coeficientes de ocupación (para 20' y 40') y paso de máquina como estables a medio y corto plazo.

Para terminar vamos a hacer una comparación del rendimiento de una terminal para diferentes valores del parámetro α en función de los grados de ocupación.

Los resultados del cálculo se muestran en la tabla y gráfico siguientes, si bien, en el gráfico para una mayor claridad solo hemos incluido los valores extremos de α .

ALFA \ OCUPACION	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2
Ocupación Crítica	84,52%	83,57%	82,62%	81,67%	80,71%	79,76%
100,00%	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
95,00%	0,0849	0,0866	0,0887	0,0913	0,0938	0,0962
90,00%	0,1697	0,1733	0,1774	0,1826	0,1876	0,1923
85,00%	0,2546	0,2599	0,2661	0,2739	0,2813	0,2885
80,00%	0,3307	0,3466	0,3548	0,3653	0,3751	0,3846
75,00%	0,3713	0,3867	0,4038	0,4239	0,4445	0,4662
70,00%	0,4144	0,4289	0,4448	0,4633	0,4820	0,5014
65,00%	0,4593	0,4726	0,4869	0,5034	0,5199	0,5368
60,00%	0,5052	0,5169	0,5294	0,5436	0,5578	0,5722
55,00%	0,5513	0,5612	0,5718	0,5837	0,5954	0,6075
50,00%	0,5968	0,6049	0,6134	0,6230	0,6326	0,6424
45,00%	0,6411	0,6474	0,6541	0,6617	0,6693	0,6773
40,00%	0,6838	0,6886	0,6937	0,6995	0,7055	0,7121
35,00%	0,7249	0,7285	0,7323	0,7368	0,7416	0,7472
30,00%	0,7647	0,7674	0,7704	0,7740	0,7780	0,7830
25,00%	0,8039	0,8061	0,8086	0,8116	0,8153	0,8201
20,00%	0,8433	0,8452	0,8475	0,8504	0,8541	0,8591
15,00%	0,8840	0,8858	0,8882	0,8912	0,8952	0,9008
10,00%	0,9269	0,9290	0,9316	0,9349	0,9395	0,9458
5,00%	0,9733	0,9757	0,9787	0,9826	0,9878	0,9953
0,00%	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000

Tabla 25 Rendimientos para diferentes combinaciones de 20' y 40' siendo $\beta=1$ y 0 es decir todas las máquinas de 2+1 y cero de 3+1.

Observamos que para valores medios de la ocupación tenemos mejores rendimientos a medida que aumenta la proporción de 40' aunque para valores muy altos el efecto se va amortiguando. Este efecto es producido por la ocupación crítica que disminuye a medida que aumenta la proporción de 40'.

En los gráficos siguientes podemos observar la sensibilidad del rendimiento para diferentes proporciones de β y α .

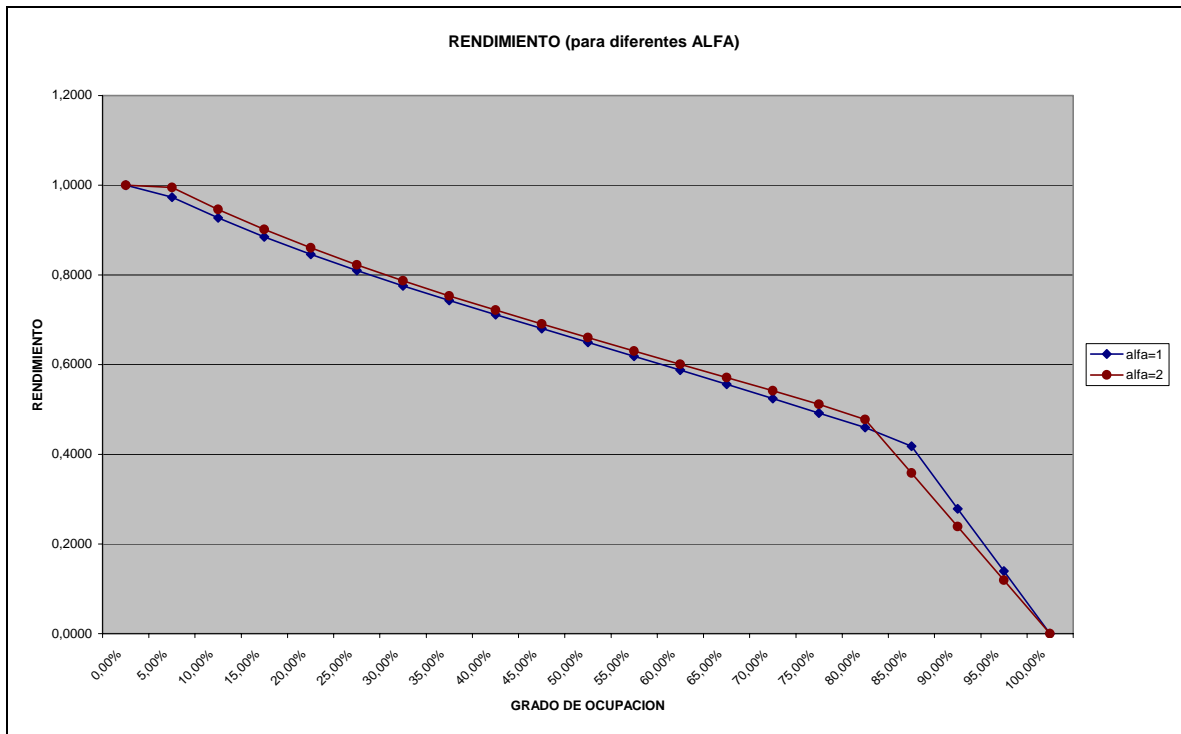


Gráfico 22 Rendimientos para $\alpha=1$ y 2 en función de la ocupación, siendo $\beta=0,75$ y 0,25 es decir un 75% de 2+1 y un 25% de 3+1.

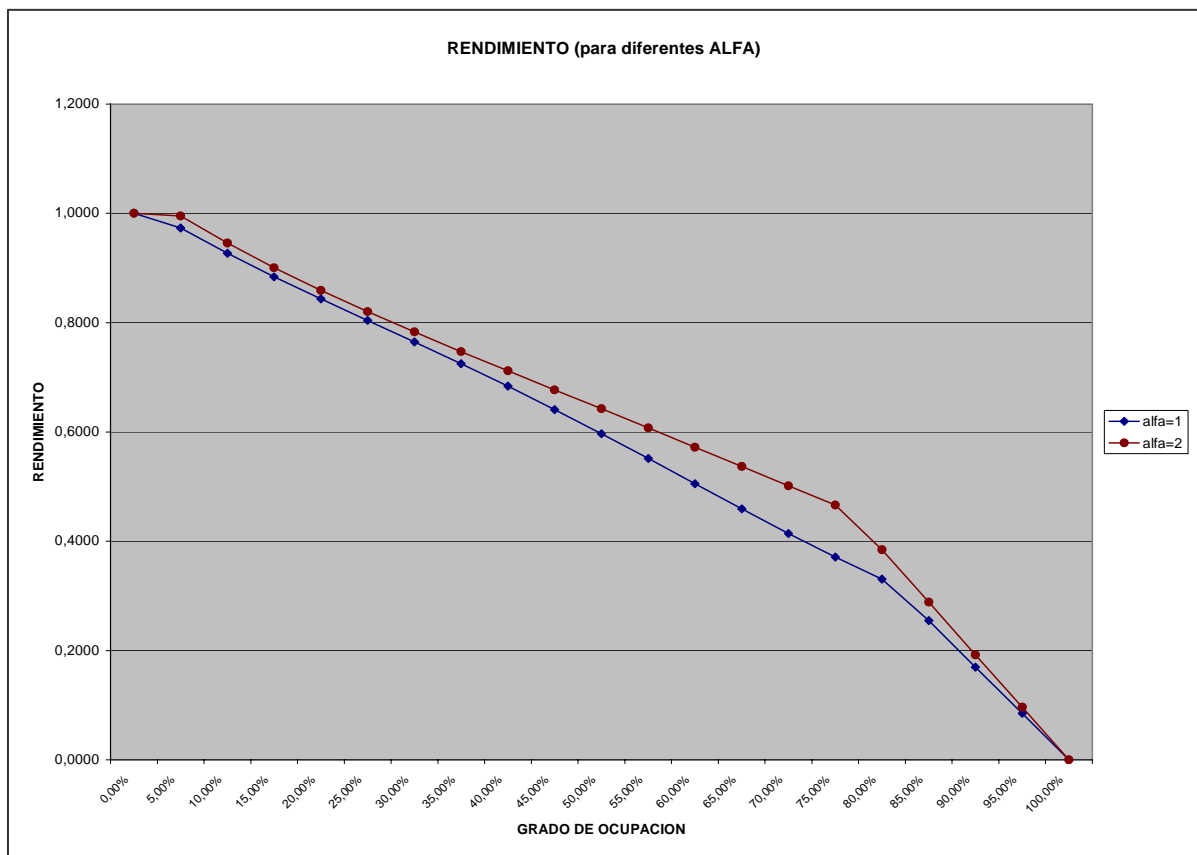


Gráfico 23 Rendimientos para $\alpha=1$ y 2 en función de la ocupación, $\beta=1$ y 0 es decir un 100% de 2+1 y un 0% de 3+1.

5 UMBRALES DE PRODUCCIÓN

5.1 Introducción y premisas

En este apartado nos planteamos encontrar el grado de ocupación óptimo de una terminal de contenedores. Como en cualquier otra empresa consideramos los umbrales de producción como función de los costes, productividad y precios.

Suponemos que el precio que cobra la Terminal por estancia de los containers en explanada pueden ser:

1. Cero o muy inferior a los precios de manipulación, motivo por el cual no los tendremos en cuenta a la hora de maximizar beneficios.
2. El precio es lo suficientemente disuasivo como para que los containers no superen el periodo de estancia libre, con lo cual tampoco los tendremos en cuenta.

Cuando hablamos de producción nos referimos a TEUS movidos por periodo (por ejemplo un año) siendo fácilmente deducible de esta producción la ocupación media¹ y de ahí el índice de altura, las remociones y por último el rendimiento.

Resumiendo, dados un volumen de tráfico, estancias, costes y precios buscaremos la ocupación óptima² que maximice el beneficio. Evidentemente si no hubiese ninguna restricción³ el óptimo coincidiría con la estancia mínima del container en Terminal, es decir descargaría y saldría por puerta, entraría por puerta y cargaría o se traspasaría directamente sin pasar por explanada.

En realidad el volumen de tráfico viene dado por el mercado, estando asociado a una ocupación media y siendo las estancias de los containers la única variable dependiente del mercado⁴ con la que podemos jugar si queremos mejorar el rendimiento y minimizar los costes.

Para este análisis supondremos que la Terminal de Contenedores se encuentra en un mercado en *competencia perfecta* y seguiremos el método del equilibrio parcial⁵. Aunque descartamos otras estructuras de mercado tradicionales como son el monopolio, el oligopolio y la competencia monopolística, debemos de considerar ciertas restricciones a nuestro supuesto:

¹ Mediante las estancias de los contenedores en terminal.

² No necesariamente tiene que coincidir con la ocupación crítica.

³ Ley de las productividades decrecientes, costes, etc.

⁴ Evidentemente que hay otras variables que influyen en los costes de una terminal como el rendimiento de las grúas *portainer* en la operativa de buque y el rendimiento en la entrega y recepción de containers por tierra.

⁵ Solo tenemos en cuenta el mercado del transporte y en especial el marítimo y todo su entorno.

- Históricamente ha sido un mercado muy intervencionista. Las Autoridades Portuarias otorgan concesiones mediante procedimiento de adjudicación abierto y modalidad de concurso.
- Teóricamente son mercados abiertos, aunque en realidad mediante una política de cánones y tasas adecuada se puede beneficiar la candidatura más “oficialista”.
- Podemos considerar una curva de la oferta en competencia perfecta pero no ocurre lo mismo en cuanto a la demanda de los factores de producción, concretamente la mano de obra portuaria, la cual forma un monopolio en la mayoría de los países occidentales, el resto de factores de producción intervienen en competencia perfecta.
- Las empresas en *competencia perfecta* maximizan beneficios a corto plazo aunque también consideraremos el largo de forma algo más restringida.

Por último consideraremos las siguientes premisas para el cálculo de costes, precios y movimientos:

¿Que sucede con los costes de amortización de maquinaria, costes de combustible y costes de movimientos de explanada?

- Los costes de amortización van incluidos en los costes fijos
- Los costes de combustible y mano de obra portuaria son costes variables
- Los costes de movimientos de explanada son costes variables asociados a los costes de buque

Una segunda opción sería considerar un término adicional por costes variables de combustible y otro por costes de mano de obra de explanada que no consideraremos separadamente en aras a una mayor claridad de los modelos⁶.

Los rendimientos de buque

- En este trabajo tendremos en cuenta el peor de los casos es decir una estiba totalmente aleatoria.
- Una segunda opción, que no tendremos en cuenta inicialmente, sería ajustar el rendimiento en función del grado de homogeneidad de cada estiba (I, E, T, V).

Podemos considerar una producción conjunta buque/explanada?

- Según los puntos anteriores podemos integrar los costes de ambas operativas
- Considerando que todo movimiento tiene dos etapas:
 - Export: Transferencia y buque
 - Import: Buque y transferencia
 - Trasbordo: Descarga y carga buque. Incluyendo movimientos de explanada en cuanto a la preparación previa a la carga.

⁶ El ajuste de estos términos, aunque mucho más sencillos que los de buque, sería despreciable y alargaría innecesariamente las expresiones.

- Vacíos: Pueden ser carga, descarga o trasbordo. Incluyen movimientos de preparación.

En consecuencia podemos considerar que cada movimiento tiene:

- Una descarga⁷ donde no hay remociones a priori.
- Una carga donde las remociones dependen del grado de homogeneidad de su estiba.
- Los vacíos son homogéneos por definición pero tienen un coste asociado por clasificación de tipos⁸ y líneas.

La conclusión es que podemos considerar un modelo conjunto donde el rendimiento es función del índice de altura⁹ de la Terminal, además por cada movimiento de buque contabilizamos un movimiento asociado de explanada¹⁰. Los costes y precios totales incluyen buque y transferencia.

5.2 Umbrales de producción y punto de equilibrio. Definición.

Distinguiremos tres umbrales (figura 26) en función del tramo en donde se encuentre el nivel de producción:

Umbral de la Ley de Productividad (A): Es el punto donde los costes marginales¹¹ alcanzan su mínimo, este punto coincide como es lógico, con el máximo de la productividad marginal. Dicho de otra manera a partir de este punto los costes marginales crecen más que proporcionalmente con respecto a la producción¹².

Umbral de Producción (B): Es el punto donde los costes marginales (C_{mg}) cortan la curva de los costes medios variables (C_{mv}) siendo éste su mínimo. En consecuencia, este punto nos marca el precio mínimo al cual debemos producir para cubrir los costes variables, por debajo de este precio de mercado y de esta producción no cubriremos de ninguna manera los costes variables y normalmente dejaremos de producir. También se le conoce como *mínimo de planta* ó *de producción*.

Umbral del Beneficio (C): Es el punto de corte de los costes marginales con los costes medios totales C_{mt} (mínimo) este punto marca el precio mínimo y el nivel de producción necesarios para cubrir los costes totales. Subiendo el precio a partir de este punto la empresa empieza a obtener beneficios, es por ello que también se le llama *óptimo de producción* u *óptimo de planta*.

Resumiendo, los costes medios (variables o totales) descienden mientras la curva de costes marginales se halle por debajo de ellos. El mínimo de los costes marginales (A)

⁷ El concepto de carga o descarga es genérico y puede ser atributo de buque, camión o ferrocarril.

⁸ 20 y 40 pies, Open Top, High Cube, etc.

⁹ En cada etapa siempre existe una fase de carga (buque, camión, ferrocarril o preparación) con posibles remociones

¹⁰ Son una extensión de los movimientos de buque

¹¹ Es el coste por cada unidad adicional producida

¹² Ley de las productividades decrecientes.

es el punto a partir del cual los costes marginales empiezan a crecer más que proporcionalmente a la producción hasta que se cruzan con los costes medios variables coincidiendo con su mínimo (B) y por último se cruzan con el mínimo (C) de los costes medios totales.

En definitiva una terminal de contenedores portuaria empezará a tener beneficios a partir de la producción y precio correspondientes al Umbral del Beneficio (óptimo de producción), es decir la capacidad efectiva (producción) donde el coste marginal (por TEU) es igual al coste medio total, que se corresponde con el coste medio total mínimo.

Por último en el *Punto de equilibrio (D)* la empresa maximizará beneficios cuando los costes marginales sean iguales al precio de mercado, punto en el que desaparecen los beneficios extraordinarios¹³ y a partir del cual por cada unidad producida los costes serán iguales o superiores a los ingresos y en consecuencia no habrá beneficios o se producirán pérdidas.

Seguidamente¹⁴ expresaremos analíticamente los puntos B, C y D a excepción del A donde es evidente que a partir del mínimo de los costes marginales estos dejan de decrecer para aumentar más que proporcionalmente con la producción. Entonces dado un nivel de producción, costes y nivel de precios tendremos que:

En el *Umbral de Producción (punto B)* los costes marginales (C_{mg}) son iguales a los costes medios variables (C_{mv}) cortándose ambas funciones en el mínimo de los costes medios variables,

$$C_{mg} = C_{mv} .$$

Efectivamente, teniendo en cuenta que las funciones de los costes tienen forma de U y que el coste marginal no es más que la derivada de los costes totales o variables, es decir el coste por producir un TEU adicional y sabiendo que,

$$CT = CV + CF$$

Siendo,

- CT los costes totales
- CV los costes variables
- CF los costes fijos
- X la producción en TEUS
- w el precio
- C_{mt} el coste medio total
- C_{mv} el coste medio variable
- C_{mg} el coste marginal. Coste por cada unidad adicional producida
- B_{mg} beneficio marginal
- I_{mg} ingreso marginal

si derivamos,

¹³ Los beneficios ordinarios van incluidos en los costes, Manuel Ahijado (1986, 246)

¹⁴ Todos los desarrollos y demostraciones son de elaboración propia

$$CT' = CV' = C_{mg}$$

es decir, que la derivada de los costes totales (CT) es igual a la derivada de los costes variables (CV) y al coste marginal (C_{mg}) como era de esperar. Siendo CV función del nivel de producción (x) en TEUS, tendremos que el coste medio variable será,

$$C_{mv} = \frac{CV}{x},$$

además el coste marginal es,

$$C_{mg} = CV'$$

pero,

$$C'_{mv} = \frac{d}{dx} \left(\frac{CV}{x} \right) = \frac{CV'x - CV}{x^2}$$

entonces,

$$C'_{mv} = \frac{1}{x} \left(CV' - \frac{CV}{x} \right)$$

pero los dos términos entre paréntesis del segundo miembro son el coste marginal (C_{mg}) y coste medio variable (C_{mv}) respectivamente, sustituyendo,

$$C'_{mv} \cdot x = C_{mg} - C_{mv}$$

entonces,

$$C_{mg} = C_{mv} + C'_{mv} \cdot x$$

y

$$C_{mg} = C_{mv} \text{ para } \begin{cases} x = 0 \\ C'_{mv} = 0 \rightarrow \text{mínimo} \end{cases}$$

Entonces, decimos que cuando el coste marginal coincide con el coste medio variable, es precisamente en su mínimo, al carecer de sentido $x=0$, como queríamos demostrar.

Condición necesaria para el *Umbral del Beneficio (punto C)*

$$C_{mg} = C_{mt}$$

Desarrollando de forma análoga al Umbral de Producción,

$$CT = CV + CF$$

y el coste medio total será,

$$C_{mt} = \frac{CV + CF}{x}$$

derivando

$$C'_{mt} = \frac{CV' \cdot x - CV - CF}{x^2} = \frac{1}{x} \left[CV' - \frac{CV}{x} - \frac{CF}{x} \right]$$

Igual que antes, los términos del segundo miembro entre paréntesis son el coste marginal, coste medio variable y coste medio fijo. Sustituyendo y simplificando,

$$\begin{aligned} C'_{mt} &= \frac{1}{x} [C'_{mg} - C_{mv} - C_{mf}] \\ &= \frac{1}{x} [C'_{mg} - C_{mt}] \end{aligned}$$

despejando,

$$C_{mg} = C_{mt} + C'_{mt} \cdot x$$

$$C_{mg} = C_{mt} \text{ para } \begin{cases} x = 0 ; \text{ el } C_{mt} \text{ no está definido} \\ C'_{mt} = 0 \rightarrow \text{mínimo} \end{cases}$$

entonces el coste marginal es igual al coste medio total en su punto mínimo, como queríamos demostrar.

Condición necesaria para el *Punto de Equilibrio* o máximo de los beneficios

$$B_{mg} = 0, \rightarrow C_{mg} = I_{mg} = w.$$

Siendo w el precio por TEU.

Este es el punto de equilibrio donde se maximizan los beneficios en tanto en cuanto más se eleve el precio medio ponderado de mercado de los movimientos (cargas, descargas, entregas, recepciones, etc.) hasta llegar a un equilibrio a largo plazo¹⁵ donde no habrá beneficios extraordinarios.

Dicho de otra manera decimos que optimizamos la ocupación en el punto en que el beneficio marginal es cero, lo que significa que el ingreso marginal es igual al coste marginal (condición necesaria), siendo la condición suficiente para que el beneficio sea máximo que la derivada¹⁶ del coste marginal sea superior a la del ingreso marginal, esto significa que los costes marginales serán superiores a los ingresos marginales a partir de este punto.

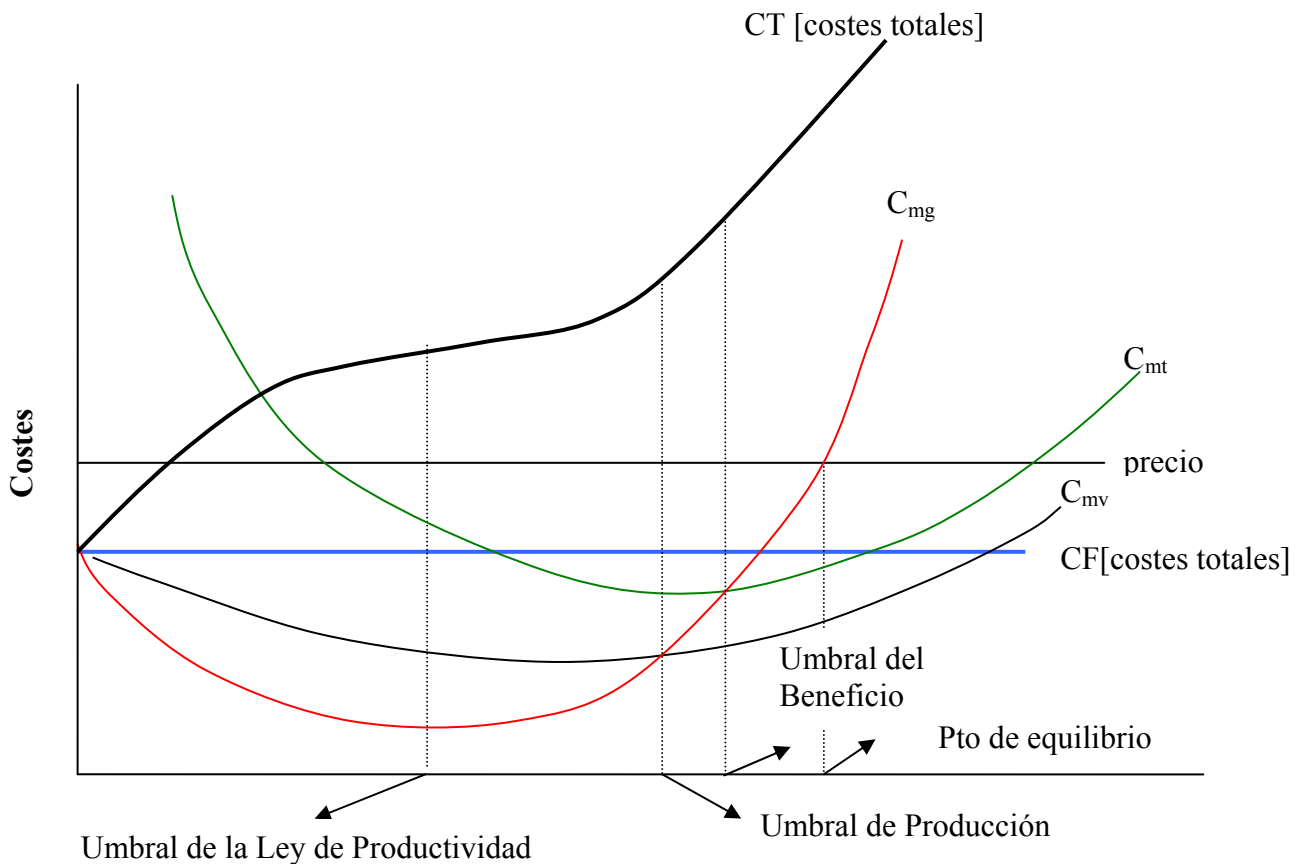
Cumpliendo estas dos condiciones el nivel de producción del punto de equilibrio se correspondería con el beneficio máximo bajo unos precios de mercado y una determinada economía de escala. Entonces en un modelo de equilibrio parcial (de la industria) y tomando la competencia perfecta como estructura más aproximada de este mercado¹⁷ tendremos que la condición suficiente es,

$$\frac{d I_{m g}}{d x} < \frac{d C_{m g}}{d x} .$$

¹⁵ Entrarán o saldrán empresas bajando o subiendo el precio de mercado, cambiarán las economías de escala, etc.

¹⁶ En realidad son las segundas derivadas ya que los valores marginales son las primeras derivadas

¹⁷ Aunque de forma relajada se cumplen sus premisas (precio aceptantes, un número importante de empresas en la industria, etc.)



Índice de ocupación

Figura 26 Umbrales de producción, en un mercado de Competencia Perfecta a corto plazo

En la figura anterior tengamos en cuenta que la escala de los costes totales es diferente a la de los costes medios o unitarios y la de los marginales.

5.3 Análisis de los Umbrales y Punto de Equilibrio en una terminal marítima de contenedores. Costes variables, costes totales y coste marginal.

Como hemos dicho en el apartado anterior los umbrales de producción y del beneficio son los puntos donde los costes medios variables y totales son mínimos y el punto de equilibrio es donde el beneficio marginal es cero y maximizamos el beneficio para un nivel de precios y producción dado.

Para una terminal de contenedores el tráfico o volumen de producción viene determinado por el mercado, siendo las variables y parámetros de decisión los que

pueden optimizar la producción mediante los costes, rendimientos operativos¹⁸ y las diferentes condiciones contractuales¹⁹.

En este apartado determinaremos los costes asociados a diferentes niveles de producción, sus umbrales y punto de equilibrio en función de las condiciones del mercado.

Como hemos dicho anteriormente consideraremos los precios y costes ponderados por las operaciones de buque y sus correspondientes costes asociados de tierra²⁰. Definamos variables y parámetros:

- j , es el coste mínimo por unidad producida. Incluye mano de obra y combustible
- C_u es el coste por unidad producida
- CT , coste total y coste variable CV
- C_{mg} coste marginal
- C_{mv} coste medio variable
- C_{mt} coste medio total
- W , es el precio de mercado por TEU producido que aplicamos a los servicios de la Terminal
- M , las *Manos* son el número de equipos humanos utilizado para operar un buque, cada mano está compuesta por diferentes especialidades²¹
- i , la *Intensiva* es la duración de cada periodo de tiempo. Normalmente hay cuatro intensivas por jornada (día)
- D , es el tiempo de demora por intensiva. Tiempo en minutos sin producción
- J , es el número jornales por *MANO* e *INTENSIVA* incluyendo transferencia
- C_{fv} es el coste fijo variable por mano. Incluyendo movimientos asociados de transferencia.
- γ , es el factor de utilización de la mano, horas utilizadas sobre el total contratado
- α , factor de distribución de 20' y 40' pies
- E , gastos diferidos en porcentaje sobre costes directos por producción
- R , es el rendimiento de explanada
- R_G el rendimiento bruto por hora de grúa buque
- R_M el rendimiento mínimo garantizado (al estibador) por hora de grúa buque
- R_C el rendimiento de grúa máximo según ciclo de máquina
- x , la producción (número de TEUS producidos)
- O , es la ocupación
- I , es el índice de ocupación
- e , la estancia media por contenedor
- T , el periodo de tiempo analizado

¹⁸ Buque y Tierra.

¹⁹ Costes de producción y precios por estancias de los containers, carga y descarga de buque, entrega y recepción a camión, aduanas e inspecciones de sanidad, carga y descarga de ferrocarril y movimientos horizontales por inspecciones varias. En todos los casos anteriores las tarifas van en función de que sean containers de 20' o 40' pies, de que sean llenos o vacíos y de que sean movimientos de importación, exportación o trasbordos.

²⁰ Puerta y ferrocarril.

²¹ Por ejemplo un gruista, un capataz, tres bordos, un confronta, dos medios mecánicos y sobordista.

- S_G son los *slot grounds* o número de huellas en explanada (número de contenedores de 20' que caben a una altura)

Primero hallaremos el número de manos utilizadas, para ello utilizaremos el rendimiento de explanada (R) para corregir el rendimiento de grúa (R_G), el factor de distribución (α) para convertir la producción de TEUS a containers y el factor de utilización (γ) para corregir el número de manos utilizado, entonces,

$$M = \frac{x}{R_G \cdot i \cdot \gamma \cdot \alpha}$$

Al dividir la producción por el rendimiento de intensiva ($R_G \cdot i$) obtendríamos el total de manos si estas se utilizasen al 100%, pero como ya hemos dicho (γ) es el factor de utilización, siendo necesario corregir el total de manos por ese factor para obtener el número de manos realmente utilizado.

Para el cálculo del (R_G) consideramos que en el peor de los casos, es decir cuando el rendimiento de explanada es cero, la grúa hará un 20% del rendimiento de su ciclo de máquina²², siendo el 80% del rendimiento de grúa restante función del rendimiento de explanada.

$$R_G = 0,2 \cdot R_C + 0,8R(n) \cdot R_C$$

$$= R_C[0.2 + 0.8R(n)]$$

Aunque en este trabajo les asignemos unos valores de 0.2 y 0.8 estos coeficientes son parametrizables en función de las características de cada terminal.

El coste por unidad producida $C_u(x)$, la calculamos mediante el siguiente modelo²³ que es una variante del destajo simple.

$$C_u = \begin{cases} j, & \text{si } R_G \leq 2 \cdot R_M \\ \left(\frac{R_G}{R_M} - 1\right)j, & \text{si } R_G > 2 \cdot R_M \end{cases}$$

Que es lo mismo que el siguiente modelo,

²² Siempre existen soluciones de emergencia.

²³ Elaboración propia

$$C_u = \begin{cases} j, & \text{si } \left(\frac{R_G}{R_M} - 1\right)j < j \\ \left(\frac{R_G}{R_M} - 1\right)j, & \text{si } \left(\frac{R_G}{R_M} - 1\right)j \geq j \end{cases}$$

Citaremos además del destajo simple los sistemas de primas más utilizados en la industria, indicando en cada caso sus fines.

- El destajo simple prima la productividad en función del nivel de actividad del trabajador, si no trabaja no cobra nada, si la actividad es la normal o la esperada cobra su salario nominal, cuando dobla la actividad normal cobra una prima equivalente a su salario.
- En el sistema Taylor Merrick se prima la actividad por tramos, en este caso el salario nominal es el mínimo que se percibe.
- El sistema Rowan es una función logarítmica donde el mínimo es el salario nominal y la prima tiende a cero a medida que aumenta la actividad. Se utiliza en industrias donde una actividad excesiva puede perjudicar la calidad del producto.
- El sistema Halsey es prácticamente igual al destajo simple solo que el trabajador cobra un mínimo igual a su salario y además una prima proporcional (entre 0 y 1) al destajo simple, en este caso el operario participa en parte del beneficio que recibe la empresa fruto de una mayor productividad de los trabajadores.

En nuestro modelo la empresa garantiza las condiciones necesarias para que el estibador pueda producir un mínimo por hora R_M y en cualquier caso el estibador cobra el salario mínimo garantizado²⁴. Además por su parte el estibador no empieza a cobrar prima hasta que no supera el doble del rendimiento mínimo. En resumen la empresa garantiza un salario al estibador y éste en contraprestación no cobra prima alguna hasta que no supera el doble del mínimo garantizado.

Este sistema de primas es diferente al de la industria en general donde se prima la producción adicional sobre el mínimo pactado, en el entorno portuario y dadas las variables aleatorias que intervienen en la producción se prima por unidad producida penalizando para la empresa estibadora (Terminal de Contenedores en este caso) las demoras que se generen por causa ajena (armador, buque, consignatario, etc.) o por causa de la Terminal (averías de grúas, maquinaria, saturación de la Terminal, planificación de la producción, etc.). Todo lo anterior se traduce en un coste por demoras y un mínimo garantizado por jornal²⁵.

Los gastos diferidos en porcentaje sobre costes directos por producción $\varepsilon(x)$ se calculan sobre la producción (x) y el número de jornales por mano, el coste fijo variable por

²⁴ Tiene un salario mínimo garantizado incluido en los costes fijos variables (Cfv) igual al R_M por 6 horas (intensiva) sea cual fuere el rendimiento.

²⁵ El consumo de combustible se comporta de igual forma, utilizando un mínimo hasta que la producción se dispara produciéndose un extracoste al sobrepasar la velocidad económica de la maquinaria.

mano C_{fv} , y el coste por demoras D es inmediato una vez conocida la expresión del número de manos,

$$\varepsilon(x) = \frac{C_u(x) \cdot J \cdot E}{\alpha} x$$

$$c_{fv}(x) = \frac{C_{fv} \cdot J}{R_G \cdot i \cdot \gamma \cdot \alpha} x = C_{fv} \cdot M \cdot J$$

$$d(x) = \frac{C_u(x) \cdot J \cdot D \cdot M}{M \cdot i \cdot \gamma \cdot \alpha} x = \frac{C_u(x) \cdot J \cdot D}{i \cdot \gamma \cdot \alpha} x.$$

En la última expresión, del coste de las demoras, debemos de tener en cuenta que volvemos a corregir el número de manos (M) por el factor de utilización. Esto es debido a que en realidad no estamos actuando sobre (M) sino sobre (i) con el fin de obtener la proporción de tiempo de demora sobre el total utilizado.

Ahora podemos calcular los costes variables teniendo en cuenta la parte de fijo variable (C_{fv}) en función del número de manos, y la parte variable en función del número de containers producido, considerando en ambos casos el total de jornales por mano como ya hemos dicho anteriormente.

$$CV(x) = \frac{C_{fv} \cdot J}{R_G \cdot i \cdot \alpha \cdot \gamma} x + \frac{C_u(x) \cdot J}{\alpha} x + \frac{C_u(x) \cdot J \cdot \varepsilon}{\alpha} x + \frac{C_u(x) \cdot J \cdot D}{i \cdot \alpha \cdot \gamma} x$$

Esta es la expresión de los costes variables que simplificando,

$$CV(x) = \left[\frac{C_{fv}}{R_G \cdot i \cdot \gamma} + C_u(x) \left(1 + \varepsilon + \frac{D}{i \cdot \gamma} \right) \right] \frac{J}{\alpha} x \quad \text{Ecuación 5-1}$$

y para los costes totales,

$$CT(x) = \left[\frac{C_{fv}}{R_G \cdot i \cdot \gamma} + C_u(x) \left(1 + \varepsilon + \frac{D}{i \cdot \gamma} \right) \right] \frac{J}{\alpha} x + CF \quad \text{Ecuación 5-2}$$

si cambiamos de variable en la función del Rendimiento de Explanada $R(n)$, sustituyendo el índice de altura (n) por su expresión en términos de la producción en TEUs $n(x)$ tendremos $R(x)$.

$$R(n) = R(n(x)) = R(x).$$

Se sustituye R_G en función de R_c y dividiendo por x ,

$$C_{mv}(x) = \left[\frac{C_{fv}}{R_c \cdot i \cdot \gamma [(0,2 + 0,8 \cdot R(x))]} + C_u(x) \left(1 + \varepsilon + \frac{D}{i \cdot \gamma} \right) \right] \frac{J}{\alpha} \cdot \text{Ecuación 5-3}$$

Obtenemos en base a 5-1 la expresión del coste medio variable. Para el coste medio total haremos lo mismo pero en base a 5-2,

$$C_{mt}(x) = \left[\frac{C_{fv}}{R_c \cdot i \cdot \gamma [(0,2 + 0,8 \cdot R(x))]} + C_u(x) \left(1 + \varepsilon + \frac{D}{i \cdot \gamma} \right) \right] \frac{J}{\alpha} + \frac{CF}{x} \quad \text{Ecuación 5-4}$$

Aclaremos que en las expresiones anteriores buscamos los umbrales y el punto de equilibrio en función de la producción (x) que es la variable de la cual dependen los costes y rendimiento. Conocido el volumen de producción hallaremos la ocupación equivalente para unas condiciones de mercado dadas.

La razón por la que no buscamos directamente las ocupaciones de los diferentes umbrales y del punto de equilibrio es que ésta es función de la estancia media de los containers y para un mismo nivel de producción tendríamos diferentes ocupaciones.

Llegados a este punto abramos un pequeño paréntesis para comentar las equivalencias entre los diferentes parámetros que intervienen en una explanada de containers.

Por la fórmula de Little²⁶. Considerando que la cola de espera es la ocupación de explanada, el tiempo de espera la estancia de los containers y la tasa de llegadas la producción diaria, entonces es inmediato que²⁷,

$$O = \frac{x}{T} e$$

²⁶ Teoría de colas: El tiempo medio de espera en una cola es igual a la longitud media de la misma dividido por la tasa media de llegadas. Es evidente el paralelismo entre una línea de espera y un "parking". (Hillier-Lieberman 2001, 834-934).

²⁷ La aplicación de la teoría de colas a una explanada de containers es de elaboración propia.

observamos que efectivamente para una misma producción podemos tener diferentes niveles de ocupación considerando la estancia como un parámetro.

Si dividimos por S_G obtenemos el índice de altura n ,

$$n = \frac{e}{T \cdot S_G} x$$

dividiendo a continuación por N tendremos el índice de ocupación,

$$I_x = \frac{n}{N} = \frac{e}{T \cdot S_G \cdot N} x.$$

También observamos que la ocupación máxima (O_M) y la producción máxima (x_M) son,

$$O_M = S_G \cdot N$$

$$x_M = \frac{T \cdot S_G \cdot N}{e}$$

En cualquier caso una vez conocida la producción óptima si conseguimos bajar la estancia media y/o subir los rendimientos operativos, movemos todo el sistema hacia la derecha²⁸ (ver gráfico) y el punto de equilibrio se corresponderá con un nivel de producción más alto.

Una vez comentadas las equivalencias entre los diferentes parámetros continuamos con el cálculo de costes.

Siendo los costes variables,

$$CV(x) = \left[\frac{C_{fv}}{R_G \cdot i \cdot \gamma} + C_u(x) \left(1 + \varepsilon + \frac{D}{i \cdot \gamma} \right) \right] \frac{J}{\alpha} x$$

Sustituyendo R_G en función de R_C

²⁸ Bajamos los costes.

$$CV(x) = \left[\frac{C_{fv}}{Rc \cdot i \cdot \gamma [0,2 + 0,8 \cdot R(x)]} + C_u(x) \left(1 + \varepsilon + \frac{D}{i \cdot \gamma} \right) \right] \frac{J}{\alpha} x$$

y derivando con respecto a (x)

$$C_{mg} = \left\{ \frac{C_{fv} [0,2 + 0,8 \cdot R(x) - 0,8 \cdot R'(x) \cdot x]}{\{Rc \cdot i \cdot \gamma [0,2 + 0,8 \cdot R(x)]^2\}} + (C'_u(x) \cdot x + C_u(x)) \cdot \left(1 + \varepsilon + \frac{D}{i \cdot \gamma} \right) \right\} \frac{J}{\alpha}$$

Ecuación 5-5

Esta es la expresión de los costes marginales.

5.3.1 Umbral de Producción

Igualando coste marginal con los costes medios variables obtendremos el umbral de producción. Pero como hemos dicho en el apartado anterior esto se produce para una producción cero ó cuando $C'_{mv} = 0$

$$C_{mg} = C_{mv} \text{ para } \begin{cases} x = 0 \\ C'_{mv}(x) = 0 \rightarrow \text{mínimo} \end{cases}$$

Siendo los costes medios variables,

$$C_{mv}(x) = \left[\frac{C_{fv}}{Rc \cdot i \cdot \gamma [(0,2 + 0,8 \cdot R(x))]} + C_u(x) \left(1 + \varepsilon + \frac{D}{i \cdot \gamma} \right) \right] \frac{J}{\alpha}$$

y derivando,

$$C'_{mv}(x) = \left[- \frac{0,8 \cdot R'(x) \cdot Rc \cdot i \cdot \gamma \cdot C_{fv}}{\{Rc \cdot i \cdot \gamma [(0,2 + 0,8 \cdot R(x))]\}^2} + C'_u(x) \left(1 + \varepsilon + \frac{D}{i \cdot \gamma} \right) \right] \frac{J}{\alpha}$$

simplificando,

$$C'_{mv}(x) = \left[\frac{-0,8 \cdot R'(x) \cdot C_{fv}}{Rc \cdot i \cdot \gamma [(0,2 + 0,8 \cdot R(x))]\}^2} + C'_u(x) \left(1 + \varepsilon + \frac{D}{i \cdot \gamma} \right) \right] \frac{J}{\alpha}$$

Al ser un mínimo necesariamente debemos igualar a cero y recordando que,

$$C_u = \begin{cases} j, & \text{si } R_G \leq 2 \cdot R_M \\ \left(\frac{R_G}{R_M} - 1\right)j, & \text{si } R_G > 2 \cdot R_M \end{cases}$$

observamos que $C_u(x)$ no es derivable en $R_G = 2 R_M$ dicho punto hace que los costes medios variables presenten un punto anguloso (punto singular) en el mismo y para que se cumpla la condición necesaria de mínimo²⁹,

$$\left[\frac{-0.8 \cdot R'(x) \cdot C_{\hat{v}}}{R_C \cdot i \cdot \gamma [(0,2 + 0,8 \cdot R(x))]^2} + C'_u(x) \left(1 + \varepsilon + \frac{D}{i \cdot \gamma} \right) \right] \frac{J}{\alpha} = 0,$$

es decir para $C'_{mv} = 0$ es necesario que en la expresión anterior los dos términos del primer miembro sean iguales y de signo contrario o bien cero. El primer término es siempre positivo al ser siempre $R'(x) < 0$ debido a que el rendimiento de explanada es decreciente. El segundo término es negativo y mayor en valor absoluto³⁰ a la izquierda del punto singular y cero a la derecha del mismo. Esto significa que los dos términos caso de igualarse lo harían necesariamente en el tramo a la izquierda³¹ del punto singular o en el mismo.

En consecuencia la expresión anterior es negativa³² a la izquierda del punto no derivable y positiva a la derecha con lo que se cumple la condición de existencia de mínimo en el punto singular cuando no coinciden las derivadas por la izquierda y por la derecha del punto anguloso. Además la derivada por la izquierda es cero en este punto por tener forma de U por este lado y de V por la derecha.

Por lo tanto vamos a analizar la expresión del C_{mv} para hallar el valor de (x) en su punto anguloso que se corresponderá con su Umbral de Producción o mínimo.

Entonces, este mínimo existe a partir de que se cumpla la siguiente condición,

²⁹ En teoría su derivada no es cero pero para nuestro caso numéricamente es prácticamente cero del orden de la cienmilésima a ambos lados del punto anguloso obtuso y casi llano.

³⁰ Aumenta en valor absoluto con la producción debido a que la derivada del rendimiento de explanada aumenta su pendiente negativa hasta los 2/3 de la producción crítica.

³¹ A la derecha es imposible por ser cero el segundo término.

³² Podríamos profundizar más pero en aras a una mayor claridad y a no salirnos del objetivo de este trabajo basta considerar que en este caso los C_{mv} tienen forma de media U por la izquierda y de media V por la derecha.

si, $\frac{R_G}{R_M} = 2$ entonces,

$$C_u(x) = \left(\frac{R_G}{R_M} - 1 \right) j = j$$

en cualquier caso,

$$\text{si, } R_G \leq 2 \cdot R_M \rightarrow C_u(x) = j$$

y su derivada

$$C'_u(x) = 0$$

Sustituyendo,

$$\frac{[0.2 + 0.8 \cdot h(x)] \cdot R_C}{R_M} = 2$$

despejando,

$$h(x) = \frac{10R_M - R_C}{4R_M}.$$

Pero el rendimiento se puede expresar en función de las remociones $S(x)$ según la ecuación 4-25,

$$h(x) = \frac{1}{1 + S(x)},$$

e igualando ambas expresiones,

$$\frac{1}{1 + S(x)} = \frac{10R_M - R_C}{4R_M}$$

$$S(x) = \frac{5R_C - 10R_M}{R_M - R_C} . \quad \text{Ecuación 5-6}$$

Según la ecuación 4-21 tenemos que las remociones esperadas para el próximo movimiento en función del índice de altura será,

$$S_m = \frac{N-1}{2} \frac{n}{N} - \frac{N-n}{N} \frac{N-1}{2} \frac{1}{Nr} + \left(\frac{r-2}{4} + \frac{1-(-1)^r}{8r} \right) \left(\frac{n}{N} \right)^{p+1} \left(\frac{N}{p} \right)^r$$

cambiamos de variable sustituyendo n por x siendo,

$$n = \frac{e}{T \cdot S_G} x$$

sustituyendo,

$$S(x) = \frac{N-1}{2} \cdot \frac{e}{T \cdot S_G \cdot N} x - \left(1 - \frac{e}{T \cdot S_G \cdot N} x \right) \cdot \frac{N-1}{2} \cdot \frac{1}{Nr} + \left(\frac{r-2}{4} + \frac{1-(-1)^r}{8r} \right) \left(\frac{e}{T \cdot S_G \cdot N} x \right)^{p+1} \left(\frac{N}{p} \right)^r$$

simplificando,

$$\begin{aligned} S(x) &= \frac{N-1}{2 \cdot N} \cdot \frac{e}{T \cdot S_G} \left(1 + \frac{1}{Nr} \right) x - \frac{N-1}{2Nr} + \left(\frac{r-2}{4} + \frac{1-(-1)^r}{8r} \right) \cdot \left(\frac{e}{T \cdot S_G \cdot N} x \right)^{p+1} \left(\frac{N}{p} \right)^r \\ &= \left(\frac{r-2}{4} + \frac{1-(-1)^r}{8r} \right) \cdot \left(\frac{e}{T \cdot S_G \cdot N} \right)^{p+1} x^{p+1} + \frac{N-1}{2 \cdot N} \cdot \frac{e}{T \cdot S_G} \left(1 + \frac{1}{Nr} \right) x - \frac{N-1}{2Nr} \end{aligned}$$

Asignando coeficientes a los términos paramétricos,

$$A = \left(\frac{r-2}{4} + \frac{1-(-1)^r}{8r} \right) \cdot \left(\frac{e}{T \cdot S_G \cdot N} \right)^{p+1}$$

$$B = \frac{N-1}{2 \cdot N} \cdot \frac{e}{T \cdot S_G} \left(1 + \frac{1}{Nr} \right)$$

$$C = \frac{N-1}{2Nr}$$

Entonces, con estos parámetros la ecuación 4-21 en función de la producción será,

$$S(x) = Ax^{p+1} + Bx - C \quad \text{Ecuación 5-7}$$

igualando las ecuaciones 5-6 y 5-7 tendremos,

$$\frac{5R_C - 10R_M}{R_M - R_C} = Ax^{p+1} + Bx - C$$

si hacemos

$$Q = C + \frac{5R_C - 10R_M}{R_M - R_C}$$

tendremos,

$$Ax^{p+1} + Bx - Q = 0 \quad \text{Ecuación 5-8}$$

Esta es la expresión del Umbral de Producción para el sistema que hemos propuesto y que posteriormente utilizaremos para el cálculo numérico.

En general si C_{mv} fuese derivable en todos sus puntos tendríamos,

$$\left[\frac{-0.8 \cdot R'(x) \cdot C_{fv}}{R_C \cdot i \cdot \gamma [0.2 + 0.8 \cdot R(x)]^2} + C'_u(x) \left(1 + \varepsilon + \frac{D}{i \cdot \gamma} \right) \right] \frac{J}{\alpha} = 0$$

se sustituye $C'_u(x)$

$$\left[\frac{-0.8 \cdot R'(x) \cdot C_{fv}}{R_C \cdot i \cdot \gamma [0.2 + 0.8 \cdot R(x)]^2} + \frac{0.8 \cdot R'(x) \cdot R_C}{R_M} j \left(1 + \varepsilon + \frac{D}{i \cdot \gamma} \right) \right] \frac{J}{\alpha} = 0$$

si se simplifica

$$\left[\frac{-C_{fv}}{R_C \cdot i \cdot \gamma [0.2 + 0.8 \cdot R(x)]^2} + \frac{R_C}{R_M} j \left(1 + \varepsilon + \frac{D}{i \cdot \gamma} \right) \right] = 0$$

haciendo,

$$L = \left(1 + \varepsilon + \frac{D}{i \cdot \gamma} \right)$$

entonces,

$$[0,2 + 0,8 \cdot R(x)]^2 = \frac{C_{fv} \cdot R_M}{j \cdot L \cdot \gamma \cdot Rc^2 \cdot i}$$

de donde,

$$R(x) = \frac{5}{4} \sqrt{\frac{C_{fv} \cdot R_M}{j \cdot L \cdot \gamma \cdot Rc^2 \cdot i}} - \frac{1}{4}$$

sustituyendo $R(x)$ por su ecuación en función de que el Umbral se encuentre por debajo por encima o en el punto crítico obtendremos el Umbral de Producción. Aquí calcularemos solo en el caso en que se encuentre por debajo.

$$R(x) = \frac{1}{1 + Ax^{p+1} + Bx - C}$$

igualando,

$$\frac{1}{1 + Ax^{p+1} + Bx - C} = \frac{5}{4} \sqrt{\frac{C_{fv} \cdot R_M}{j \cdot L \cdot \gamma \cdot Rc^2 \cdot i}} - \frac{1}{4}$$

para,

$$\frac{5}{4} \sqrt{\frac{C_{fv} \cdot R_M}{j \cdot L \cdot \gamma \cdot Rc^2 \cdot i}} - \frac{1}{4} = K_1$$

tenemos,

$$(1 + Ax^{p+1} + Bx - C) \cdot K_1 - 1 = 0 \quad \text{Ecuación 5-9}$$

Esta sería la ecuación general del Umbral de Producción supuesta la derivabilidad de todas las funciones que intervienen y suponiendo que se encuentra por debajo del punto crítico. En general la función de primas $C_u(x)$ y salarios (j) depende de los acuerdos

entre los sindicatos y asociaciones empresariales de cada lugar, en nuestro caso hemos propuesto un caso concreto³³, que posteriormente utilizaremos para el cálculo numérico.

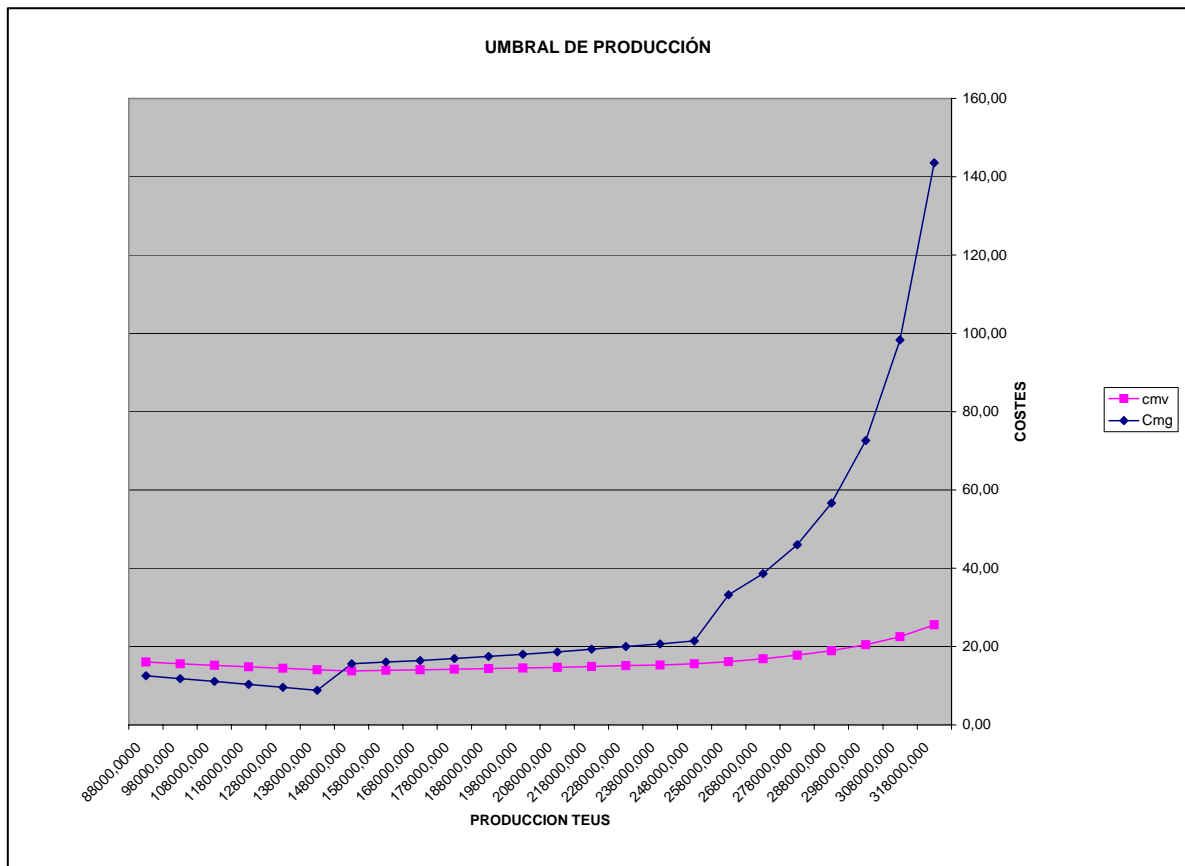


Gráfico 24 Umbral de Producción. Para e=3; S=10600; N=3; y altura de maquinaria (2+1)

5.3.2 Umbral del Beneficio

Análogamente al análisis del umbral de producción, igualando coste marginal con los costes medios totales obtendremos el umbral del beneficio.

Pero a diferencia del umbral de producción solo existe una producción donde $C'_{mt} = 0$, no estando definida la función para $x = 0$.

$$C_{mg} = C_{mt} \text{ para } \begin{cases} x = 0; C_{mt} \text{ no está definida} \\ C'_{mt}(x) = 0 \rightarrow \text{mínimo} \end{cases}$$

³³ Es frecuente que los modelos de primas presenten puntos angulosos.

Además hemos de tener en cuenta que existe otro punto anguloso, debido a que el rendimiento de explanada a partir de la producción crítica (x_c) cae linealmente hasta cero según la ecuación 4-27.

$$R_c = \operatorname{tg} \theta (I_x - 1)$$

para cualquier ocupación $O_x \geq O_c$

Recordemos que la O_c viene definida por las características físicas de la Terminal y del tipo de maquinaria utilizado (ecuaciones 4-30), por lo tanto no depende del nivel de producción.

En consecuencia para calcular el Umbral del beneficio consideraremos tres intervalos:

1. siendo $x_b < x_c$
2. siendo $x_b = x_c$
3. cuando $x_b > x_c$

En función del intervalo donde se encuentre el umbral (x_b) del beneficio aplicaremos la fórmula hallada para cada uno de los tres casos, comenzaremos hallando la ecuación general para ello derivemos los costes medios totales C_{mt}

$$C_{mt}(x) = \left[\frac{C_{fv}}{R_c \cdot i \cdot \gamma [0,2 + 0,8 \cdot R(x)]} + C_u(x) \left(1 + \varepsilon + \frac{D}{i \cdot \gamma} \right) \right] \frac{J}{\alpha} + \frac{CF}{x}$$

derivando,

$$C'_{mt}(x) = \left[- \frac{0,8 \cdot R'(x) \cdot R_c \cdot i \cdot \gamma \cdot C_{fv}}{\{R_c \cdot i \cdot \gamma [0,2 + 0,8 \cdot R(x)]\}^2} + C'_u(x) \left(1 + \varepsilon + \frac{D}{i \cdot \gamma} \right) \right] \frac{J}{\alpha} - \frac{CF}{x^2}$$

teniendo en cuenta que a partir del umbral de producción $C'_u(x)$ es igual a cero y simplificando,

$$C'_{mt}(x) = \left[\frac{-0,8 \cdot R'(x) \cdot C_{fv}}{R_c \cdot i \cdot \gamma [0,2 + 0,8 \cdot R(x)]^2} \right] \frac{J}{\alpha} - \frac{CF}{x^2}$$

al ser un mínimo necesariamente debemos igualar a cero,

$$\left[\frac{-0,8 \cdot R'(x) \cdot C_{fv}}{R_c \cdot i \cdot \gamma [0,2 + 0,8 \cdot R(x)]^2} \right] \frac{J}{\alpha} - \frac{CF}{x^2} = 0$$

$$x = \sqrt{\frac{\alpha \cdot \gamma \cdot R_c \cdot CF}{0.8 \cdot C_{fv} \cdot J}} \cdot \frac{0,2 + 0,8 \cdot R(x)}{\sqrt{-R'(x)}}$$

haciendo,

$$K_2 = \sqrt{\frac{\alpha \cdot \gamma \cdot R_c \cdot CF}{0.8 \cdot C_{fv} \cdot J}}$$

tendremos,

$$x = K_2 \cdot \frac{0,2 + 0,8 \cdot R(x)}{\sqrt{-R'(x)}}$$

igualando a cero,

$$x \cdot \sqrt{-R'(x)} - K_2 \cdot [0,2 + 0,8 \cdot R(x)] = 0 \quad \text{Ecuación 5-10}$$

ésta es la ecuación general del Umbral del Beneficio pudiéndose utilizar en los tres casos mencionados simplemente sustituyendo por la ecuación del rendimiento que corresponda.

Una vez conocida la ecuación general, buscamos la solución al primer caso. Recordando que $R(x)$ y $R'(x)$ son función de las remociones ecuación 4-25,

$$R(x) = \frac{1}{1 + S(x)}$$

derivando,

$$R'(x) = \frac{-S'(x)}{(1 + S(x))^2}$$

y según la ecuación 5-7,

$$S(x) = Ax^{p+1} + Bx - C$$

tendremos que,

$$R(x) = \frac{1}{1 + Ax^{p+1} + Bx - C}$$

$$R'(x) = -\frac{A \cdot (p+1)x^p + B}{[1 + Ax^{p+1} + Bx - C]^2}$$

sustituyendo en 5-10,

$$x \cdot \sqrt{\frac{A \cdot (p+1)x^p + B}{(1 + Ax^{p+1} + Bx - C)^2}} - K_2 \cdot \left(0,2 + 0,8 \cdot \frac{1}{1 + Ax^{p+1} + Bx - C} \right) = 0$$

de donde,

$$\frac{x \cdot \sqrt{A \cdot (p+1)x^p + B} - 0,8 \cdot K_2}{1 + Ax^{p+1} + Bx - C} - 0,2 \cdot K_2 = 0 \quad \text{Ecuación 5-11}$$

En la figura siguiente observamos como se produce el corte durante el primer tramo o intervalo, antes del punto anguloso o punto correspondiente a la producción crítica.

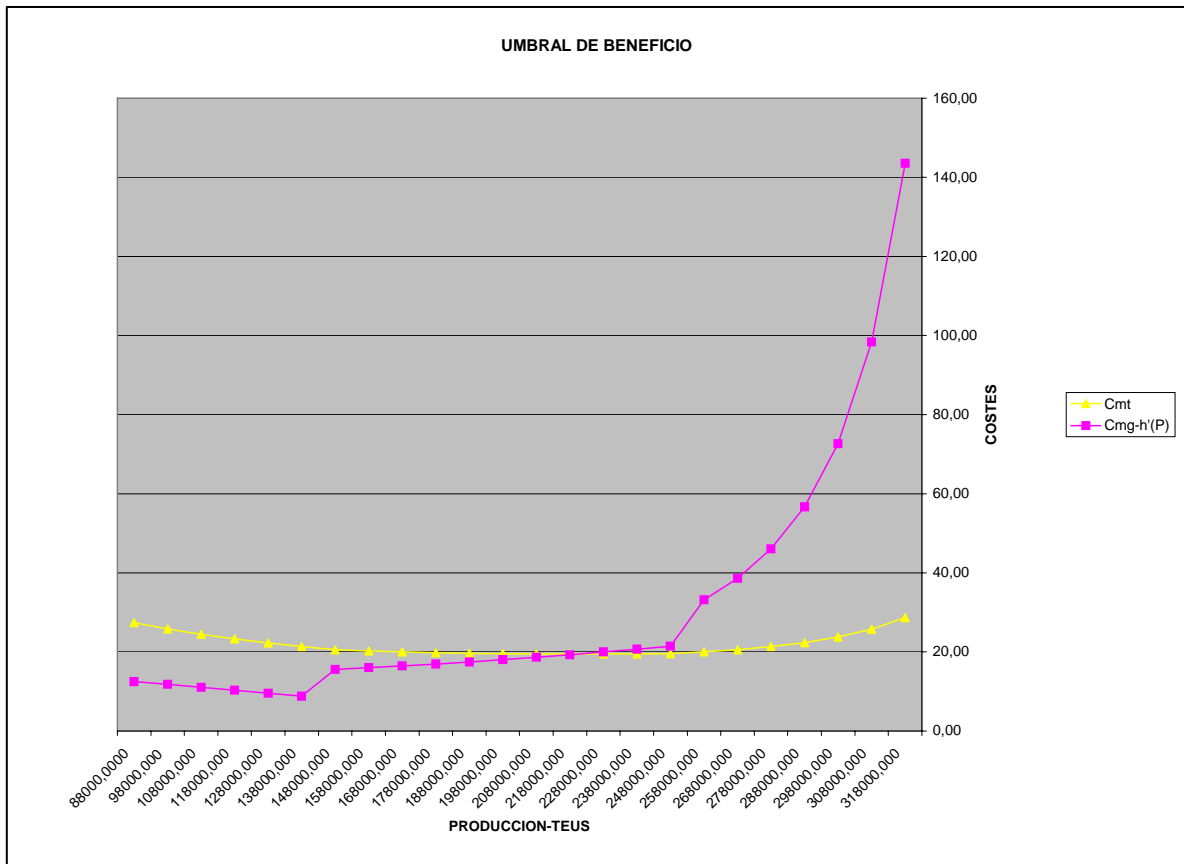


Gráfico 25 Primer caso, cuando el umbral del beneficio es $x_b < x_c$; para $e=3$; $S=10600$; $N=3$; y altura de maquinaria (2+1).

La ecuación anterior se corresponde con el Umbral del Beneficio para toda $x_b < x_c$ donde x_c es la producción crítica. Seguidamente analizaremos el tercer caso dejando el segundo para el final dadas sus especiales características. Entonces en el tercer caso cuando $x_b > x_c$ igualmente tendremos que según la ecuación general,

$$x \cdot \sqrt{-R'(x)} - K_2 \cdot [0,2 + 0,8 \cdot R(x)] = 0$$

y recordando,

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{R_c}{I_c - 1}$$

siendo el rendimiento corregido según la ecuación 4-31,

$$R_c = \operatorname{tg} \theta (I_c - 1)$$

para cualquier ocupación $O_x \geq O_c$ y siendo,

$$O_x = \frac{e}{T} \cdot x$$

dividiendo a continuación por las huellas (S) y la altura (N) tendremos el índice de ocupación,

$$I_x = \frac{e}{T \cdot S \cdot N} \cdot x$$

que sustituyendo y derivando,

$$R_c(x) = \operatorname{tg} \theta \left(\frac{e}{T \cdot S \cdot N} \cdot x - 1 \right)$$

$$R'_c(x) = \operatorname{tg} \theta \left(\frac{e}{T \cdot S \cdot N} \right)$$

sustituyendo en la ecuación 5-10

$$x \cdot \sqrt{-\operatorname{tg} \theta \left(\frac{e}{T \cdot S \cdot N} \right)} - K_2 \cdot \left[0,2 + 0,8 \cdot \operatorname{tg} \theta \left(\frac{e}{T \cdot S \cdot N} \cdot x - 1 \right) \right] = 0$$

agrupando términos,

$$x \cdot \left[\sqrt{-\operatorname{tg} \theta \left(\frac{e}{T \cdot S \cdot N} \right)} - K_2 \cdot 0,8 \cdot \operatorname{tg} \theta \left(\frac{e}{T \cdot S \cdot N} \right) \right] - K_2 \cdot (0,2 - 0,8 \cdot \operatorname{tg} \theta) = 0$$

de donde,

$$x = \frac{K_2 \cdot (0,2 - 0,8 \cdot \operatorname{tg} \theta)}{-\operatorname{tg} \theta \left(\frac{e}{T \cdot S \cdot N} \right) \cdot \left[\sqrt{\frac{-1}{\operatorname{tg} \theta \left(\frac{e}{T \cdot S \cdot N} \right)} + K_2 \cdot 0,8} \right]}$$

Ecuación 5-12

Esta es la ecuación del Umbral del Beneficio para toda $x_b > x_c$ que expresa x_b en forma paramétrica.

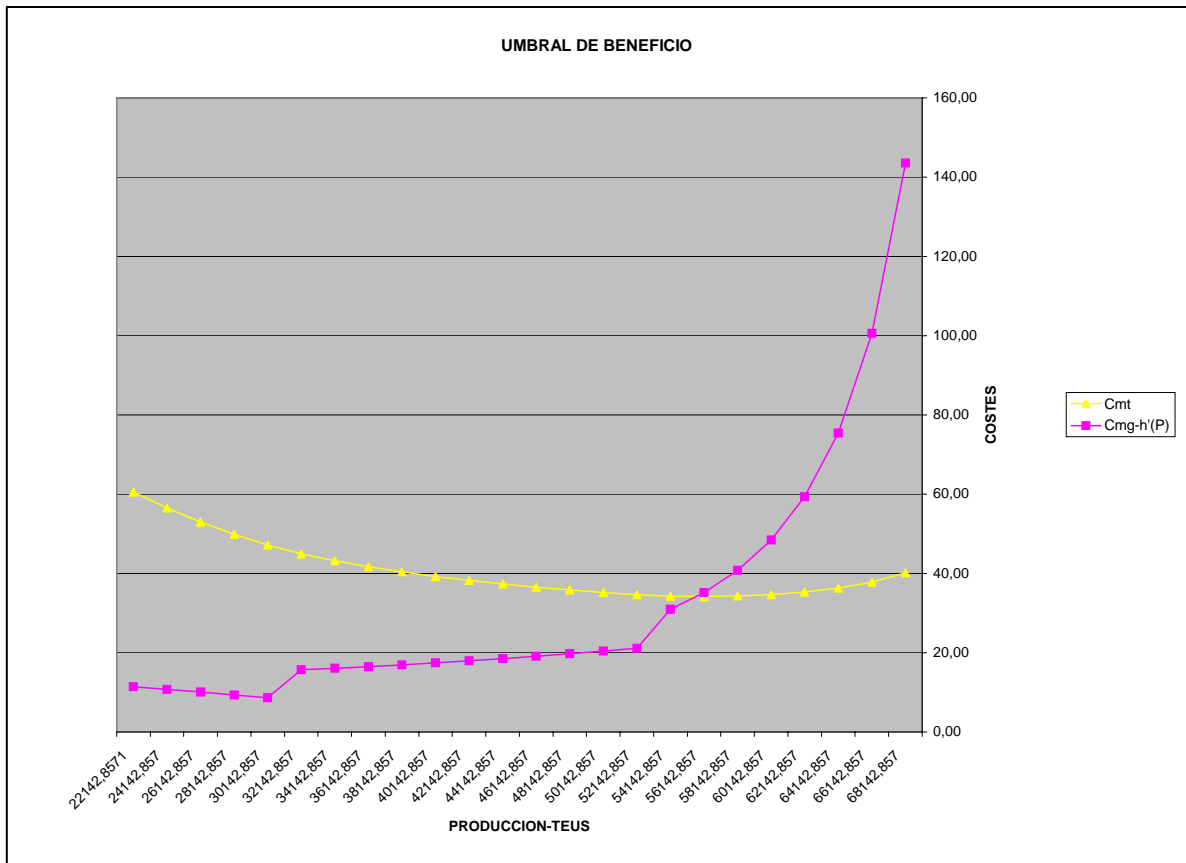


Gráfico 26 Tercer caso, cuando el umbral del beneficio es $x_b > x_c$; para $e=14$; $S=10600$; $N=3$; y altura de maquinaria (2+1)

En la figura anterior observamos como se produce el corte durante el tercer tramo o intervalo, después del punto anguloso correspondiente a la producción crítica.

Una vez analizados el primer y tercer casos, es decir los intervalos inicial y final, podemos analizar el segundo caso donde el Umbral del Beneficio coincide con la producción crítica $x_b = x_c$. Este cálculo es inmediato:

$$x_b = \frac{T \cdot O_c}{e} \quad \text{Ecuación 5-13}$$

Es interesante observar que existe un rango de estancias donde $x_b = x_c$, para las cuales el Umbral del Beneficio se corresponde con la producción crítica.

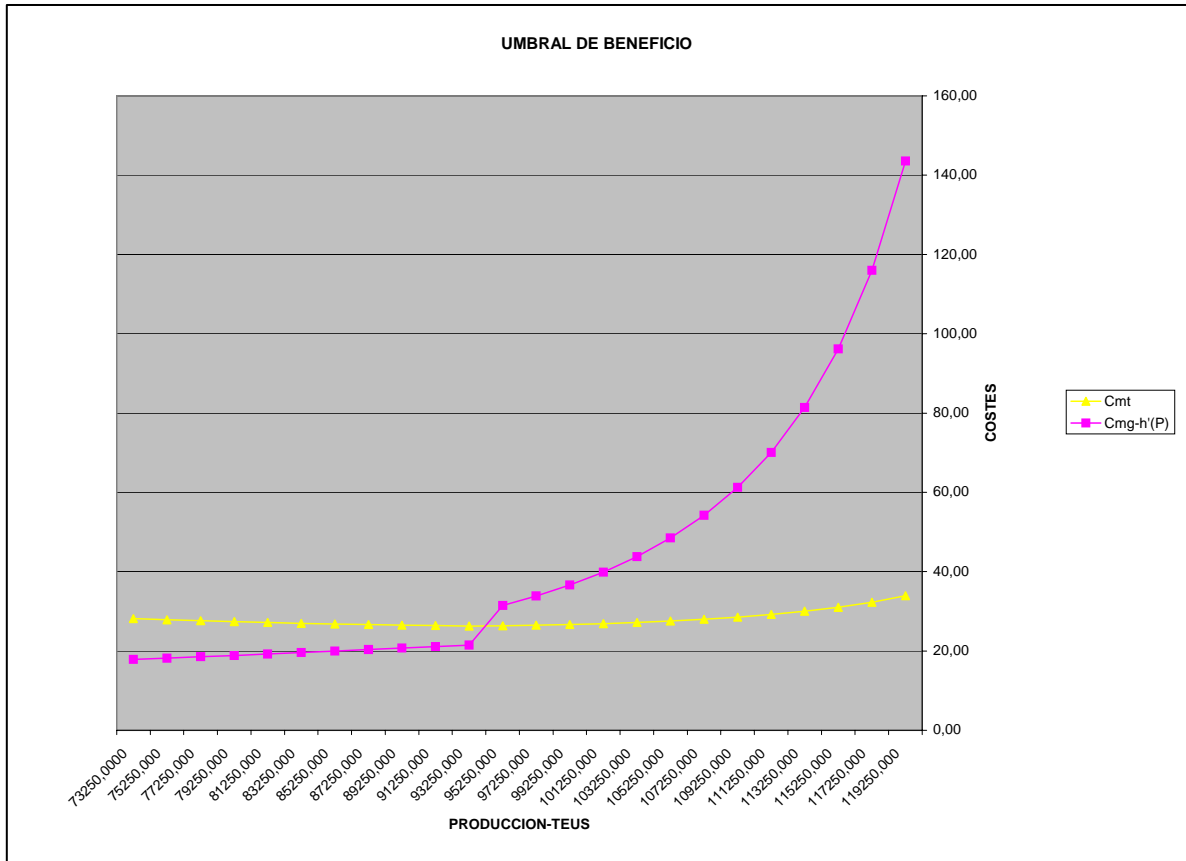


Gráfico 27 Segundo caso, cuando el umbral del beneficio es $x_b = x_c$; para $e=8$; $S=10600$; $N=3$; y altura de maquinaria (2+1)

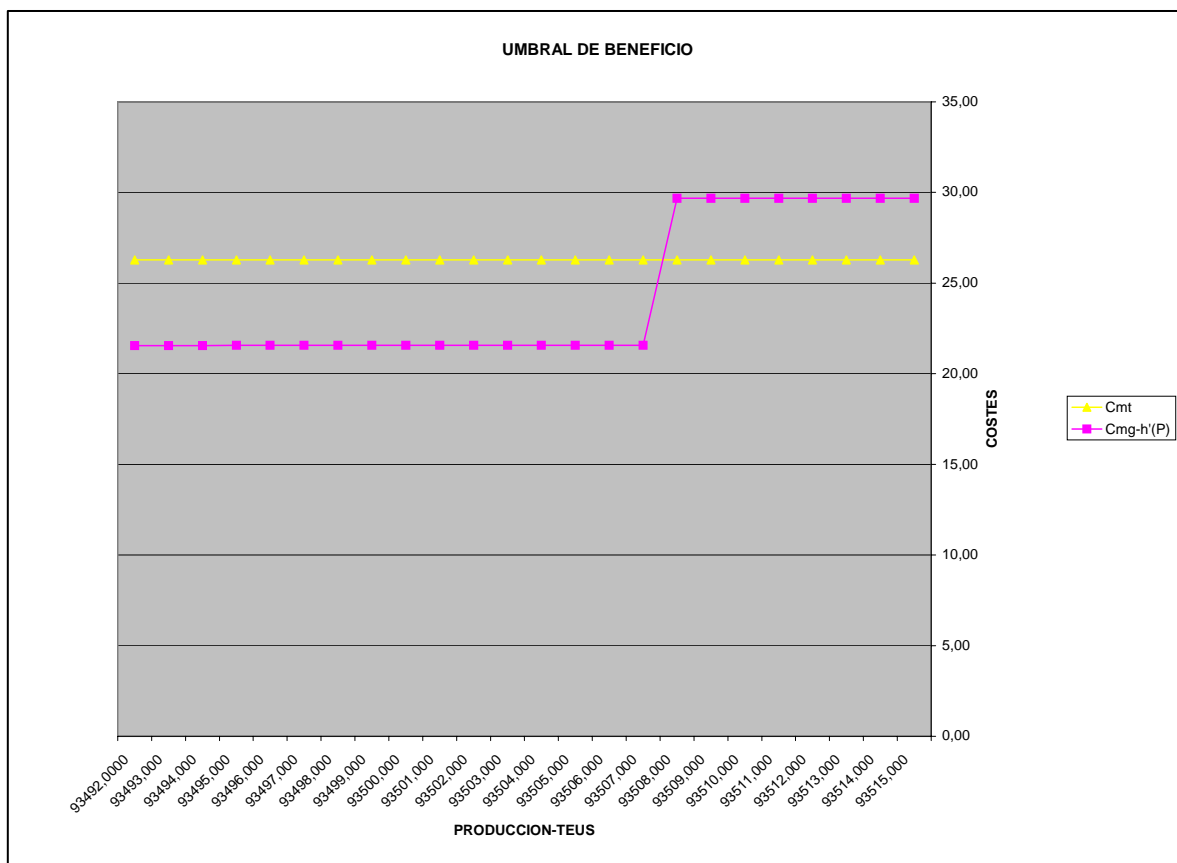


Gráfico 28 Zoom del segundo caso $X_c = 93507.14$ TEUS.

Las estancias son parámetros que vienen dados por la situación coyuntural del mercado: Disponibilidad y coste de los almacenes, agilidad de los trámites de aduana, estacionalidad de la industria y el comercio, etc., difícilmente pueden llegar a variar más de medio punto durante un mes y en ningún caso es una variable que podamos manipular operativamente.

Por ejemplo en España durante el mes de agosto las estancias de las mercancías en puerto suben entre dos y tres días sobre la media anual, ello es debido a la bajada de producción de este mes, lo que genera una acumulación de la importación de materias destinadas a las cadenas de producción y montaje, además de la acumulación de mercancías de exportación durante el mes de julio para compensar la desaceleración productiva de agosto y satisfacer la demanda externa. Algo similar ocurre en noviembre y diciembre.

Por último podemos observar la siguiente tabla³⁴ donde para unas condiciones dadas vemos que en el rango de estancias entre 4.4678 - 10.5418 coinciden producción crítica y umbral del beneficio correspondiéndose además con la ocupación crítica como era de esperar. Además en los límites por la izquierda (4.4678) y por la derecha (10.5418) coinciden producción crítica y los valores de la producción de las ecuaciones 5-11 y 5-12 respectivamente.

³⁴ Para 10600 huellas o slot grounds.

e	Xc	Xb	Ox
1,0000	748057,1429	473870,5908	15795,6864
2,0000	374028,5714	293298,7925	19553,2528
3,0000	249352,3810	220748,8114	22074,8811
4,0000	187014,2857	180685,0891	24091,3452
4,4678	167434,3084	167434,3113	24935,2385
5,0000	149611,4286	149611,4286	24935,2381
6,0000	124676,1905	124676,1905	24935,2381
7,0000	106865,3061	106865,3061	24935,2381
8,0000	93507,1429	93507,1429	24935,2381
9,0000	83117,4603	83117,4603	24935,2381
10,0000	74805,7143	74805,7143	24935,2381
10,5418	70960,8025	70960,8026	24935,2381
11,0000	68005,1948	68453,3455	25099,5600
12,0000	62338,0952	63578,5496	25431,4198
13,0000	57542,8571	59380,5769	25731,5833
14,0000	53432,6531	55725,0293	26005,0137
15,0000	49870,4762	52511,2510	26255,6255
16,0000	46753,5714	49662,2952	26486,5575
20,0000	37402,8571	40887,5188	27258,3458
25,0000	29922,2857	33585,3362	27987,7801
30,0000	24935,2381	28551,7758	28551,7758
35,0000	21373,0612	24862,3381	29006,0611
40,0000	18701,4286	22037,1822	29382,9096
45,0000	16623,4921	19801,7026	29702,5540
50,0000	14961,1429	17987,0666	29978,4443
60,0000	12467,6190	15216,8860	30433,7721
70,0000	10686,5306	13198,8510	30797,3190
80,0000	9350,7143	11661,2811	31096,7495
90,0000	8311,7460	10449,7389	31349,2168
100,0000	7480,5714	9469,8059	31566,0198
110,0000	6800,5195	8660,4425	31754,9558
112,5859	6644,3235	8473,5299	31799,9997

Tabla 26 Sensibilidad de la producción (x) con el parámetro (e)

Resumiendo, que en función de donde se produzca la intersección entre costes marginales y coste medios totales, es decir en función del intervalo o tramo, deberemos utilizar el modelo de cálculo correspondiente a dicho caso.

5.3.3 Punto de Equilibrio

La producción (x_b) marca el Umbral del Beneficio, es decir el punto a partir del cual los ingresos superan los costes totales. Seguidamente hallaremos el punto de equilibrio (x_q), igualando coste marginal e ingreso marginal (precio), siendo este el punto donde los beneficios son máximos.

$$C_{mg} = w$$

Recordando la expresión del coste marginal según la ecuación 5-5 tenemos,

$$C_{mg} = \left\{ \frac{C_{fv}[0.2 + 0.8 \cdot R(x) - 0.8 \cdot R'(x) \cdot x]}{\{Rc \cdot i \cdot \gamma [0.2 + 0.8 \cdot R(x)]^2\}} + (C'_u(x) \cdot x + C_u(x)) \cdot \left(1 + \varepsilon + \frac{D}{i \cdot \gamma}\right) \right\} \frac{J}{\alpha}$$

teniendo en cuenta que a partir del umbral de producción $C'_u(x)$ es igual a cero por ser $C_u(x) = j$ constante, tendremos³⁵,

$$C_{mg} = \left\{ \frac{C_{fv}[0.2 + 0.8 \cdot R(x) - 0.8 \cdot R'(x) \cdot x]}{\{Rc \cdot i \cdot \gamma [0.2 + 0.8 \cdot R(x)]^2\}} + j \cdot \left(1 + \varepsilon + \frac{D}{i \cdot \gamma}\right) \right\} \frac{J}{\alpha}$$

igualando con el ingreso marginal o precio,

$$\left\{ \frac{C_{fv}[0.2 + 0.8 \cdot R(x) - 0.8 \cdot R'(x) \cdot x]}{\{Rc \cdot i \cdot \gamma [0.2 + 0.8 \cdot R(x)]^2\}} + j \cdot \left(1 + \varepsilon + \frac{D}{i \cdot \gamma}\right) \right\} \frac{J}{\alpha} = w$$

agrupando términos,

$$\frac{C_{fv}[0.2 + 0.8 \cdot R(x) - 0.8 \cdot R'(x) \cdot x]}{\{Rc \cdot i \cdot \gamma [0.2 + 0.8 \cdot R(x)]^2\}} + j \cdot \left(1 + \varepsilon + \frac{D}{i \cdot \gamma}\right) - w \frac{\alpha}{J} = 0$$

La producción (x_q) que cumple con la igualdad anterior es la que se corresponde con el beneficio máximo y esto sucede en el punto de equilibrio.

Agrupando parámetros,

$$K_3 = \frac{C_{fv}}{Rc \cdot i \cdot \gamma}$$

$$K_4 = j \cdot \left(1 + \varepsilon + \frac{D}{i \cdot \gamma}\right) - w \frac{\alpha}{J}$$

entonces,

³⁵ El punto de equilibrio nunca se producirá antes del umbral de producción, en ese tramo la empresa no recupera los costes variables y por supuesto tampoco los fijos (umbral del beneficio), motivo por el cual dejaría de producir.

$$K_3 \cdot \frac{[0.2 + 0.8 \cdot R(x) - 0.8 \cdot R'(x) \cdot x]}{[0.2 + 0.8 \cdot R(x)]^2} + K_4 = 0$$

agrupamos los términos con la variable independiente,

$$\frac{[0.2 + 0.8 \cdot (R(x) - R'(x) \cdot x)]}{[0.2 + 0.8 \cdot R(x)]^2} + \frac{K_4}{K_3} = 0 \quad \text{Ecuación 5-14}$$

ésta es la ecuación general del punto de equilibrio, al igual que con el umbral del beneficio tendremos en cuenta el intervalo donde se igualan coste marginal y precio, es decir en que tramo se encuentra dicho punto para aplicar el modelo correspondiente. Empezaremos por $x_q < x_c$ es decir el corte se produce antes de la producción crítica.

Teniendo en cuenta la ecuación 5-7 tendremos que la ecuación 5-14 será,

$$\frac{0.2 + 0.8 \cdot \left(\frac{1}{1 + Ax^{(p+1)} + Bx - C} + \frac{A \cdot (p+1)x^p + B}{(1 + Ax^{(p+1)} + Bx - C)^2} \cdot x \right)}{\left(0.2 + 0.8 \cdot \frac{1}{1 + Ax^{(p+1)} + Bx - C} \right)^2} + \frac{K_4}{K_3} = 0$$

agrupando el numerador del primer término,

$$\frac{0.2 + 0.8 \cdot \left(\frac{A \cdot (p+2)x^{p+1} + 2Bx + (1-C)}{[Ax^{(p+1)} + Bx + (1-C)]^2} \right)}{\left(0.2 + 0.8 \cdot \frac{1}{Ax^{(p+1)} + Bx + (1-C)} \right)^2} + \frac{K_4}{K_3} = 0$$

simplificando el primer término,

$$\frac{0.2 \cdot [Ax^{(p+1)} + Bx + (1-C)]^2 + 0.8 \cdot [A \cdot (p+2)x^{p+1} + 2Bx + (1-C)]}{\frac{\{0.2 \cdot [Ax^{(p+1)} + Bx + (1-C)] + 0.8\}^2}{[Ax^{(p+1)} + Bx + (1-C)]^2}} + \frac{K_4}{K_3} = 0$$

$$\frac{0.2 \cdot [Ax^{(p+1)} + Bx + (1-C)]^2 + 0.8 \cdot [A \cdot (p+2)x^{p+1} + 2Bx + (1-C)]}{\{0.2 \cdot [Ax^{(p+1)} + Bx + (1-C)] + 0.8\}^2} + \frac{K_4}{K_3} = 0$$

haciendo,

$$f(x) = Ax^{(p+1)} + Bx + (1-C)$$

$$g(x) = A \cdot (p+1)x^{p+1} + Bx$$

y sustituyendo,

$$\frac{0.2 \cdot [f(x)]^2 + 0.8 \cdot [g(x) + f(x)]}{\{0.2 \cdot f(x) + 0.8\}^2} + \frac{K_4}{K_3} = 0$$

$$\frac{f(x) \cdot \left\{ 0.2 \cdot f(x) + 0.8 \cdot \left[\frac{g(x)}{f(x)} + 1 \right] \right\}}{\left\{ f(x) \cdot \left[0.2 + \frac{0.8}{f(x)} \right] \right\}^2} + \frac{K_4}{K_3} = 0$$

$$\frac{0.2 \cdot f(x) + 0.8 \cdot \left[\frac{g(x)}{f(x)} + 1 \right]}{f(x) \cdot \left[0.2 + \frac{0.8}{f(x)} \right]^2} + \frac{K_4}{K_3} = 0$$

finalmente,

$$\frac{0.2 + \frac{0.8}{f(x)} \cdot \left[\frac{g(x)}{f(x)} + 1 \right]}{\left[0.2 + \frac{0.8}{f(x)} \right]^2} + \frac{K_4}{K_3} = 0 \quad \text{Ecuación 5-15.}$$

Esta es la ecuación que utilizaremos en el primer caso, cuando el punto de corte esté por debajo del punto crítico $x_q < x_c$.

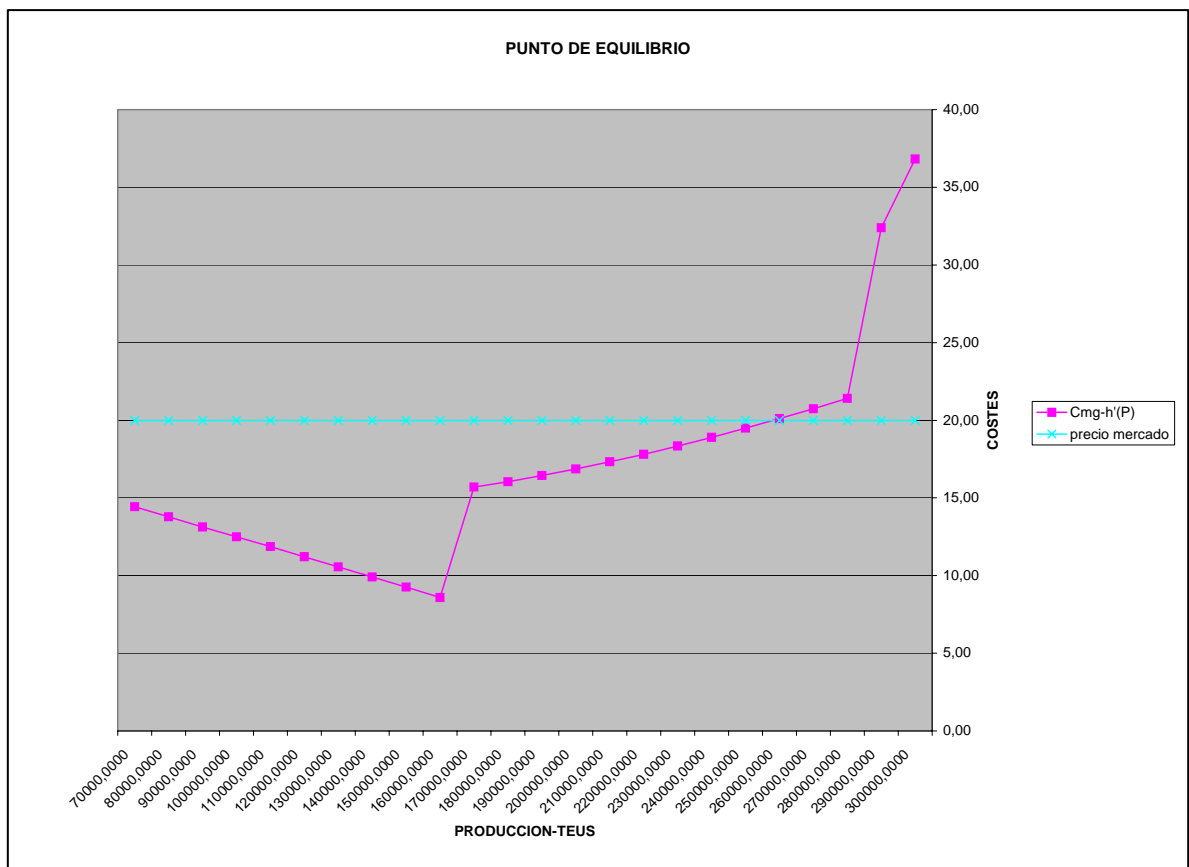


Gráfico 29 Punto de equilibrio para $x_q < x_c$.

En el tercer caso cuando el punto de corte esté por encima de la producción crítica $x_q > x_c$ según la ecuación 5-14 tendremos,

$$\frac{[0.2 + 0.8 \cdot (R(x) - R'(x) \cdot x)]}{[0.2 + 0.8 \cdot R(x)]^2} + \frac{K_4}{K_3} = 0$$

siendo $R(x)$ y $R'(x)$,

$$R_{cg}(x) = tg\theta \left(\frac{e}{T \cdot S_G \cdot N} \cdot x - 1 \right)$$

$$R'_{cg}(x) = tg\theta \left(\frac{e}{T \cdot S_G \cdot N} \right)$$

sustituyendo,

$$\frac{0.2 + 0.8 \cdot \left[tg\theta \left(\frac{e}{T \cdot S_G \cdot N} \cdot x - 1 \right) - tg\theta \left(\frac{e}{T \cdot S_G \cdot N} \right) \cdot x \right]}{\left[0.2 + 0.8 \cdot tg\theta \left(\frac{e}{T \cdot S_G \cdot N} \cdot x - 1 \right) \right]^2} + \frac{K_4}{K_3} = 0$$

simplificando,

$$\frac{0.2 + 0.8 \cdot (-tg\theta)}{\left[0.2 + 0.8 \cdot tg\theta \left(\frac{e}{T \cdot S_G \cdot N} \cdot x - 1 \right) \right]^2} + \frac{K_4}{K_3} = 0$$

separando términos,

$$\left[0.2 + 0.8 \cdot tg\theta \left(\frac{e}{T \cdot S \cdot N} \cdot x - 1 \right) \right]^2 = -\frac{K_3}{K_4} 0.2 + 0.8 \cdot (-tg\theta)$$

$$0.2 + 0.8 \cdot tg\theta \left(\frac{e}{T \cdot S \cdot N} \cdot x - 1 \right) = \sqrt{-\frac{K_3}{K_4} 0.2 + 0.8 \cdot (-tg\theta)}$$

$$0.2 + 0.8 \cdot tg\theta \left(\frac{e}{T \cdot S \cdot N} \right) x - 0.8tg\theta = \sqrt{-\frac{K_3}{K_4} 0.2 + 0.8 \cdot (-tg\theta)}$$

de donde,

$$x = \frac{\sqrt{-\frac{K_3}{K_4} \cdot 0.2 + 0.8 \cdot (-tg\theta) + 0.8tg\theta - 0.2}}{0.8 \cdot tg\theta \left(\frac{e}{T \cdot S \cdot N} \right)}$$

Ecuación 5-16

Esta es la ecuación que utilizaremos en el tercer caso, cuando el punto de corte esté por encima del punto crítico $x_q > x_c$.

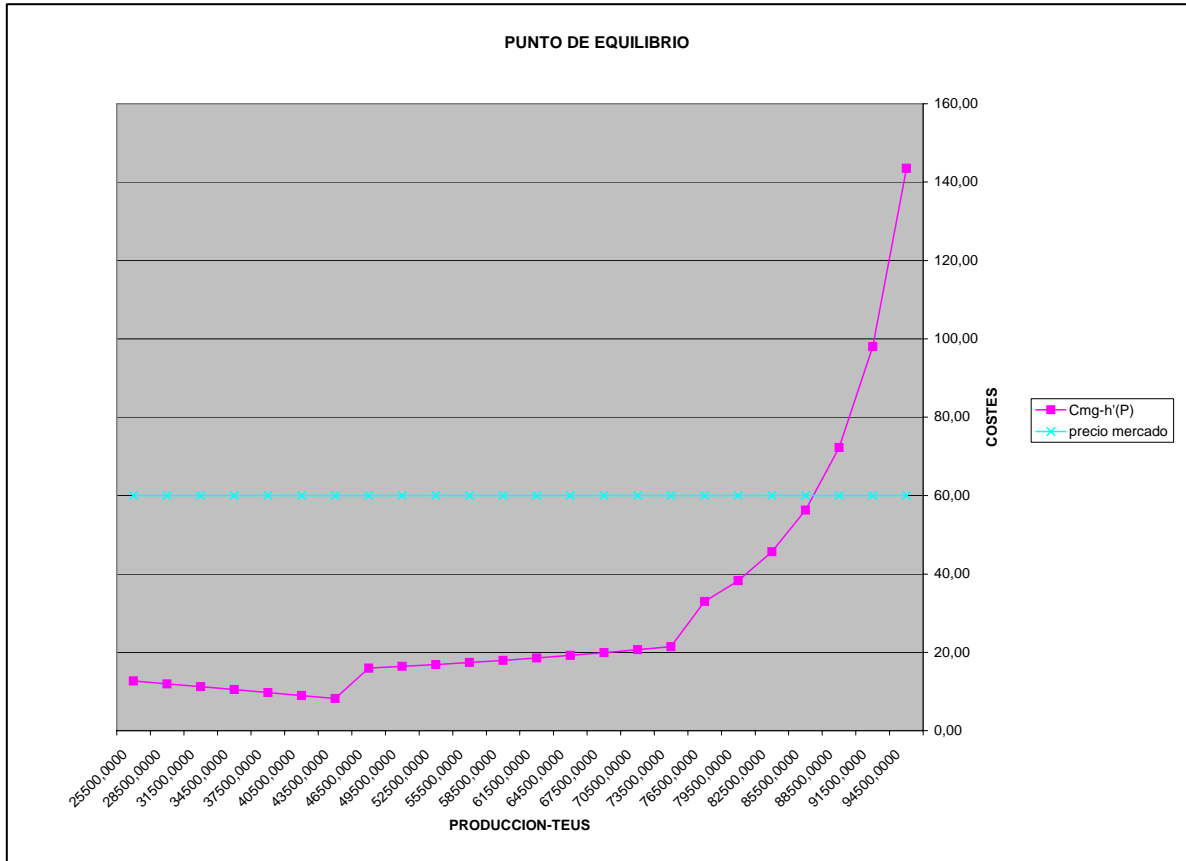


Gráfico 30 Punto de equilibrio para $x_q > x_c$

Igual que sucedía con el umbral del beneficio el segundo caso coincide con la producción crítica $x_b = x_c$ siendo su cálculo inmediato:

$$x_q = \frac{T \cdot O_c}{e} \quad \text{Ecuación 5-17}$$

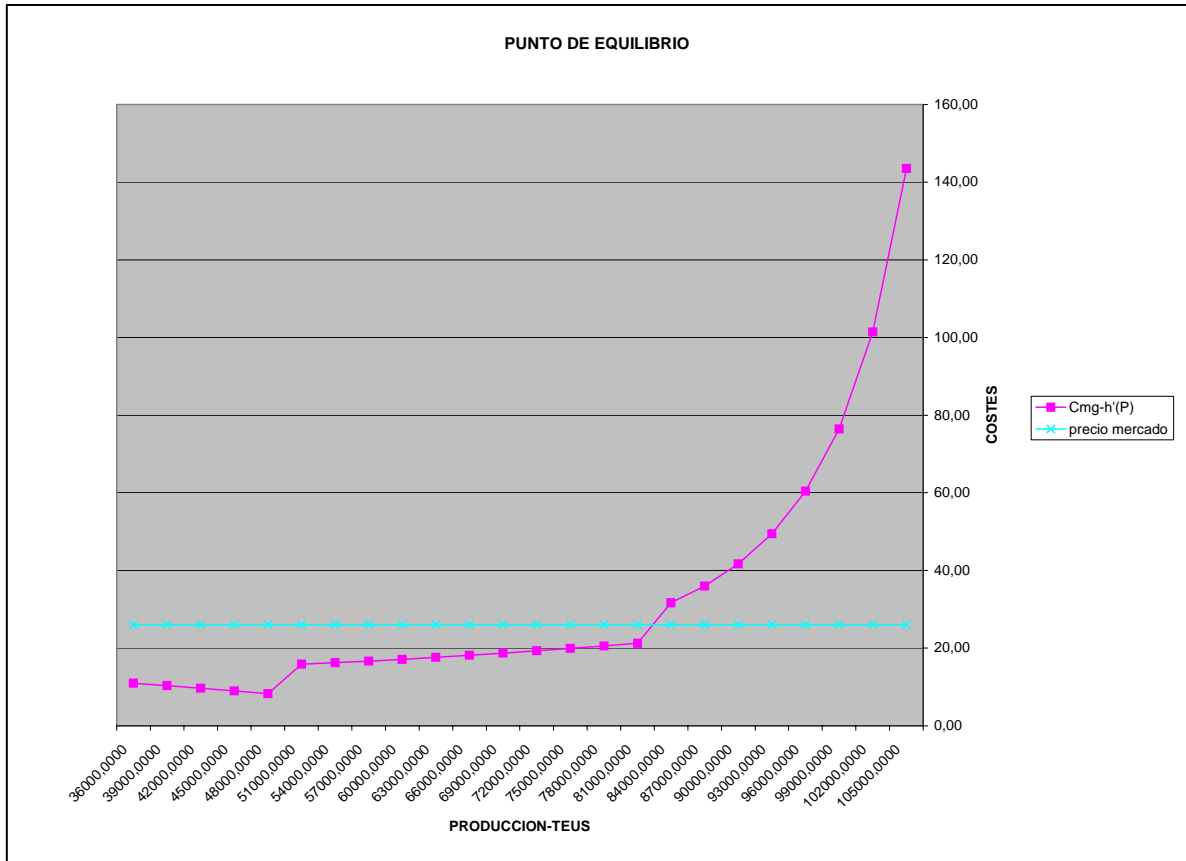


Gráfico 31 Punto de equilibrio para $x_q=x_c$

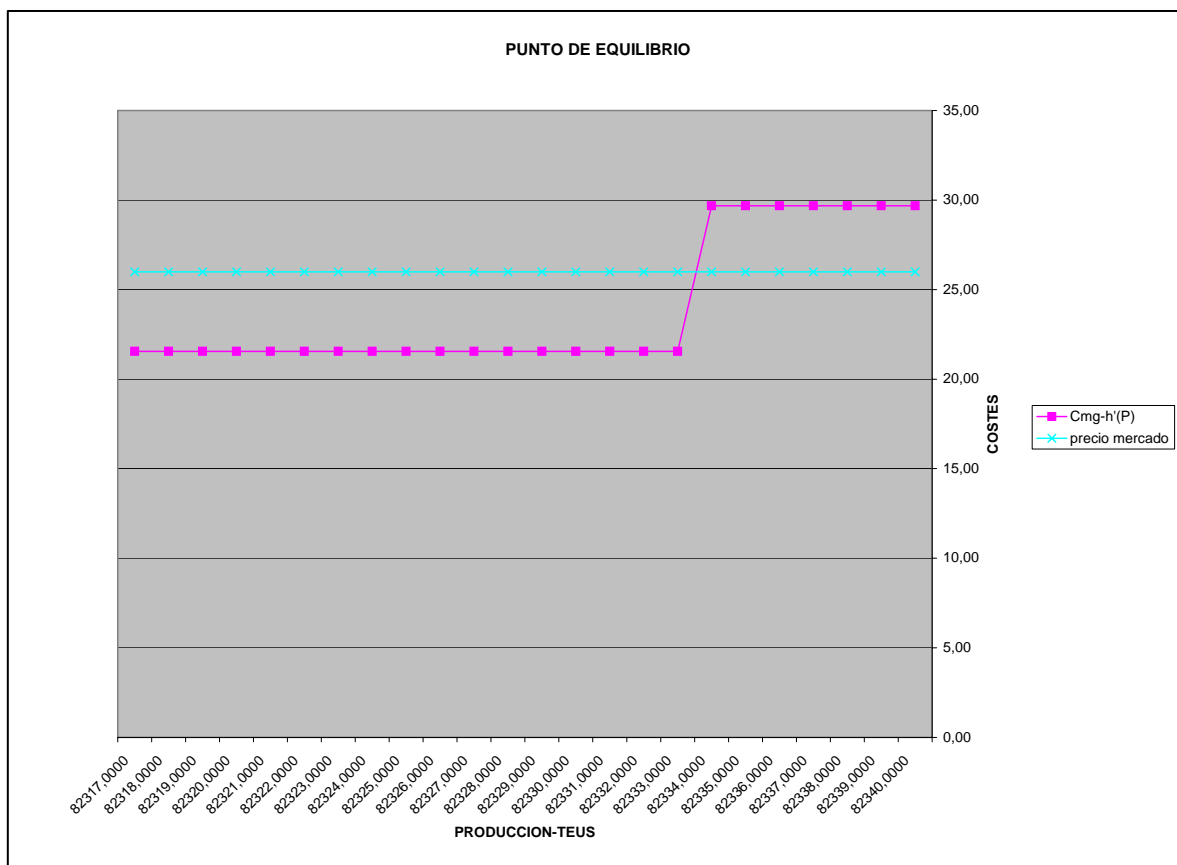


Gráfico 32 Zoom en el punto de equilibrio para $x_q = X_c$

Resumiendo, dadas unas condiciones de mercado el coste marginal será igual a la primera derivada con respecto a (x) de los costes variables; el umbral de producción será el punto donde los costes marginales igualen el coste medio variable, es decir, donde los ingresos sean iguales a los costes variables; el umbral del beneficio será el punto donde coste marginal y coste medio total sean iguales, es decir, donde ingresos y costes totales son iguales y por lo tanto el beneficio es nulo; y el punto de equilibrio será donde coste marginal y precio sean iguales, siendo este el punto donde el beneficio es máximo a corto plazo.

En el largo plazo, si existen beneficios extraordinarios en el corto, entrarán nuevas empresas aumentando la oferta y bajando los precios. También en este caso la industria buscará el punto de equilibrio a largo plazo igualando los costes medios totales a largo, costes marginales a largo y nuevo precio, esto es, un punto de equilibrio en el largo plazo³⁶, desapareciendo los beneficios extraordinarios³⁷.

³⁶ Como ya hemos dicho, esto no implica que no haya beneficios normales ya incluidos en los costes. En el largo plazo desaparecen los beneficios extraordinarios, es decir, beneficios por encima del rendimiento normal del capital riesgo.

³⁷ Economías de escala mayores aumentarán la oferta y consecuentemente bajarán los precios.

5.4 Cálculo numérico de los Umbrales y Punto de Equilibrio

En este apartado supondremos una terminal con unos parámetros determinados y haremos un cálculo numérico de sus umbrales y punto de equilibrio. En un segundo cálculo analizaremos la sensibilidad de la producción con los parámetros más significativos.

Definamos la Terminal:

- Parámetros de configuración física
 - Huellas (*Slot grounds*): 12000
 - Alfa $\alpha = 1.53$
 - Lambda (20') $\lambda_a = 0.47$
 - Lambda (40') $\lambda_b = 0.53$
 - Rows (número de pilas) combinados 20 y 40 pies
 - Altura máxima $N = 3$
 - Índice de ocupación crítica 78.41%
 - Ocupación crítica 28228.57 TEUs
 - Ocupación máxima 36000 TEUs
 - Producción crítica 89142,86 TEUs
 - Producción máxima 135000 TEUs

- Parámetros económicos
 - Coste combinado por unidad producida: $j = 0.75$ euros
 - Costes sociales por mano: 214.4 euros
 - Jornales por mano: $J = 12.5$
 - Coste fijo por jornal: $C_{fv} = (\text{costes sociales por mano})/J + (R_M * i * j)$
 - Gastos diferidos en porcentaje sobre costes directos por producción: $\varepsilon = 0.4$
 - Precio de mercado por TEU: $w = 80$ euros

- Parámetros de producción
 - Periodo 30 días
 - Intensiva 6 horas (360 minutos)
 - Productividad mínima: $R_M = 18$ containers por hora
 - Productividad máxima por hora según ciclo de máquina: $R_c = 50$ containers
 - Demora 12%; 43.2 minutos de los 360 minutos totales por intensiva
 - $\text{tg } \theta = -1.81$
 - Paso de máquina $p = 3$
 - Estancia 9.5 días
 - Factor de utilización de la mano, horas utilizadas sobre el total contratado: $\gamma = 0.8$

Como hemos visto al analizar las expresiones que definen los umbrales y punto de equilibrio no siempre es posible expresar la producción de forma directa o explícita en cuyo caso debemos transformar las expresiones y resolver de estas ecuaciones.

Existen innumerables métodos al respecto que agruparemos en:

- Métodos de intervalos (bisección; falsa posición)
 - 2 valores iniciales
 - velocidad de convergencia lenta (ineficiente)
 - estable, siempre convergente
 - aplicable solo a raíces reales
- Métodos abiertos (punto fijo; Newton-Raphson; secante)
 - 1 variable inicial
 - velocidad de convergencia muy rápida
 - puede ser divergente
 - aplicable a raíces reales e imaginarias
- Raíces de polinomios (Müller, Bairstow)
 - 2 ó 3 valores iniciales en función del método
 - velocidad de convergencia media-rápida
 - puede ser divergente
 - aplicable a raíces reales e imaginarias

En nuestro caso nos interesa un método eficiente en cuanto al cálculo numérico y computacional, además de una buena velocidad de convergencia. En ese sentido y dada la naturaleza de las ecuaciones que utilizamos para los diferentes umbrales, los métodos abiertos son los que en principio mejor se adaptan a las necesidades de nuestro cálculo, no obstante, hay que tener en cuenta que al requerir un solo valor para iniciar el cálculo existe un riesgo de divergencia.

Por ello deberemos tener en cuenta las siguientes consideraciones adicionales:

- utilizar gráficos para visualizar el comportamiento de las funciones
- considerar el número máximo de iteraciones para evitar entrar en bucles
- usar una metodología para los sistemas de paro
- una vez hallada la raíz o raíces sustituirla en la ecuación correspondiente y comprobar que su valor es cero o muy próximo al mismo.

La conclusión es que para nuestros cálculos deberemos de tener en cuenta las características y naturaleza de las ecuaciones (de cada umbral y punto de equilibrio) a la hora de aplicar uno u otro método. En general en cada caso utilizaremos el método más simple posible que optimice rapidez de convergencia y eficiencia.

5.4.1 Criterio de paro

Antes de iniciar los cálculos debemos definir el criterio de paro, para ello utilizaremos la fórmula de Scarborough, que dice que cualquier resultado es correcto en al menos (n) cifras significativas si utilizamos el siguiente error como tolerancia prefijada o límite,

$$\varepsilon_s = (0.5 \times 10^{2-n})\%$$

entonces si el error relativo aproximado es igual o inferior a la tolerancia prefijada detendremos el proceso de búsqueda

$$|\varepsilon_a| \leq \varepsilon_s$$

siendo el error relativo aproximado,

$$\varepsilon_a = \left| \frac{x_{i+1} - x_i}{x_{i+1}} \right| \%$$

también incluiremos el error relativo total o verdadero, aunque normalmente no se puede conocer a priori, una vez concluida la búsqueda se puede utilizar para el análisis de datos.

$$\varepsilon_v = \left| \frac{x_v - x_i}{x_v} \right| \%$$

siendo el error verdadero total,

$$E_v = |x_v - x_i|.$$

Dado que en una terminal marítima de contenedores de tipo medio se mueven del orden de 10^4 TEUs por mes y para una gran terminal del orden de 10^6 TEUs es decir entre 5 y 7 cifras significativas, entonces por ejemplo para $n=5$ tendremos,

$$\varepsilon_s = \pm 0.0005 \%$$

esto significa que para una terminal que mueva del orden de 10.000 a 99.000 TEUS nos aproximaremos a la unidad de TEU.

5.4.2 Cálculo del umbral de producción

Dada la naturaleza de esta función podemos utilizar métodos abiertos como el de Newton-Raphson, método de la Secante modificado o la iteración simple de Punto Fijo. En todos los casos las raíces convergen aunque con velocidades cada vez menores según el orden anterior.

Según la ecuación 5-8 el umbral de producción se produce cuando,

$$Ax^{p+1} + Bx - Q = 0$$

si hacemos la siguiente transformación,

$$x_1 = \frac{Q - Ax_0^{p+1}}{B}$$

obtenemos una expresión con la que podemos predecir el nuevo valor de (x) en función del anterior, este es el método de iteración simple de punto fijo.

iteración	X	f(X)	punto fijo	εa	εv
1	10000	-0,479986198	62850,9132		19,7229%
2	62850,9132	0,193322998	41564,2657	51,2138%	20,8254%
3	41564,2657	-0,156447455	58790,5754	29,3011%	11,9885%
4	58790,5754	0,111097534	46557,7109	26,2746%	11,3136%
5	46557,7109	-0,089848911	56450,9057	17,5253%	7,5317%
6	56450,9057	0,067644177	49002,6571	15,1997%	6,6563%
7	49002,6571	-0,054410745	54993,7826	10,8942%	4,7561%
8	54993,7826	0,04190717	50379,4161	9,1592%	4,0337%
9	50379,4161	-0,033528965	54071,2648	6,8277%	2,9988%
10	54071,2648	0,026109918	51196,3217	5,6155%	2,4776%
11	51196,3217	-0,02080284	53486,9065	4,2825%	1,8857%
12	53486,9065	0,016295629	51692,6072	3,4711%	1,5323%
13	51692,6072	-0,012944948	53117,9655	2,6834%	1,1829%
14	53117,9655	0,010174315	51997,6794	2,1545%	0,9511%
15	51997,6794	-0,008066143	52885,8362	1,6794%	0,7407%
16	52885,8362	0,006352257	52186,394	1,3403%	0,5917%
17	52186,394	-0,00502945	52740,1829	1,0500%	0,4632%
18	52740,1829	0,003965504	52303,5443	0,8348%	0,3685%
19	52303,5443	-0,00313708	52648,9658	0,6561%	0,2895%
20	52648,9658	0,002475244	52376,4185	0,5204%	0,2297%
21	52376,4185	-0,001957101	52591,9133	0,4097%	0,1808%
22	52591,9133	0,001544896	52421,8061	0,3245%	0,1432%
23	52421,8061	-0,00122109	52556,2594	0,2558%	0,1129%
24	52556,2594	0,00096417	52450,0954	0,2024%	0,0893%
25	52450,0954	-0,000761921	52533,9899	0,1597%	0,0705%
26	52533,9899	0,000601714	52467,7357	0,1263%	0,0557%
27	52467,7357	-0,000475432	52520,0852	0,0997%	0,0440%

UMBRALES DE PRODUCCION

28	52520,0852	0,000375504	52478,7387	0,0788%	0,0348%
29	52478,7387	-0,000296673	52511,4051	0,0622%	0,0275%
30	52511,4051	0,000234333	52485,6029	0,0492%	0,0217%
31	52485,6029	-0,000185128	52505,9872	0,0388%	0,0171%
32	52505,9872	0,000146233	52489,8856	0,0307%	0,0135%
33	52489,8856	-0,000115524	52502,6059	0,0242%	0,0107%
34	52502,6059	9,12548E-05	52492,5579	0,0191%	0,0084%
35	52492,5579	-7,20896E-05	52500,4956	0,0151%	0,0067%
36	52500,4956	5,69461E-05	52494,2253	0,0119%	0,0053%
37	52494,2253	-4,49858E-05	52499,1787	0,0094%	0,0042%
38	52499,1787	3,55362E-05	52495,2658	0,0075%	0,0033%
39	52495,2658	-2,80724E-05	52498,3568	0,0059%	0,0026%
40	52498,3568	2,21757E-05	52495,9151	0,0047%	0,0021%
41	52495,9151	-1,75179E-05	52497,844	0,0037%	0,0016%
42	52497,844	1,38383E-05	52496,3203	0,0029%	0,0013%
43	52496,3203	-1,09317E-05	52497,5239	0,0023%	0,0010%
44	52497,5239	8,63552E-06	52496,5731	0,0018%	0,0008%
45	52496,5731	-6,8217E-06	52497,3242	0,0014%	0,0006%
46	52497,3242	5,38883E-06	52496,7309	0,0011%	0,0005%
47	52496,7309	-4,25694E-06	52497,1996	0,0009%	0,0004%
48	52497,1996	3,36279E-06	52496,8293	0,0007%	0,0003%
49	52496,8293	-2,65646E-06	52497,1218	0,0006%	0,0002%
50	52497,1218	2,09848E-06	52496,8908	0,0004%	0,0002%

Tabla 27 Para valores pequeños converge muy lentamente

Hemos necesitado de 50 iteraciones para obtener la aproximación deseada de 0.0005% o inferior. Este método converge hasta aproximadamente el 200% de su valor verdadero, si comprobamos para valores iniciales > 105000 TEUS veremos que diverge.

iteración	X	$f(X)$	punto fijo	\mathcal{E}_a	\mathcal{E}_v
1	105400	1,916254856	-105597,357		301,1493%
2	-105597,357	0,011491306	-106862,656	1,1840%	303,5596%
3	-106862,656	0,075218679	-115144,927	7,1929%	319,3362%
4	-115144,927	0,562525803	-177084,213	34,9773%	437,3226%
5	-177084,213	10,01168828	-1279463,55	86,1595%	2537,2130%

Tabla 28 Para valores iniciales > 200% de su valor verdadero diverge

Para valores iniciales próximos a su valor real es cuando tiene la mejor convergencia.

iteración	X	f(X)	punto fijo	ϵ_a	ϵ_v
1	52500	4,88887E-05	52494,6169		0,0045%
2	52494,6169	-3,86206E-05	52498,8694	0,0081%	0,0036%
3	52498,8694	3,05081E-05	52495,5102	0,0064%	0,0028%
4	52495,5102	-2,41003E-05	52498,1638	0,0051%	0,0022%
5	52498,1638	1,9038E-05	52496,0676	0,0040%	0,0018%
6	52496,0676	-1,50393E-05	52497,7235	0,0032%	0,0014%
7	52497,7235	1,18803E-05	52496,4154	0,0025%	0,0011%
8	52496,4154	-9,38494E-06	52497,4488	0,0020%	0,0009%
9	52497,4488	7,41366E-06	52496,6325	0,0016%	0,0007%
10	52496,6325	-5,85647E-06	52497,2773	0,0012%	0,0005%
11	52497,2773	4,62634E-06	52496,7679	0,0010%	0,0004%
12	52496,7679	-3,65461E-06	52497,1703	0,0008%	0,0003%
13	52497,1703	2,88698E-06	52496,8524	0,0006%	0,0003%
14	52496,8524	-2,28058E-06	52497,1035	0,0005%	0,0002%
15	52497,1035	1,80156E-06	52496,9052	0,0004%	0,0002%

Tabla 29 Con 5 iteraciones ya tenemos una aproximación a la unidad de TEU

En resumen este método dada su sencillez converge de forma razonable teniendo al mismo tiempo una buena fiabilidad.

Probaremos a continuación el método el de Newton-Raphson algo más complejo pero como veremos mucho más rápido y eficiente.

Igual que con el método del Punto Fijo haremos un cálculo para un valor pequeño otro similar al valor verdadero y otro con un valor mucho mayor.

El método de Newton-Raphson utiliza la primera derivada de la función. En el caso del umbral de producción es fácil de calcular,

$$f_p(x) = Ax^{p+1} + Bx - Q = 0$$

derivando con respecto a (x)

$$f'_p(x) = A \cdot (p + 1) \cdot x^p + B = 0$$

siendo la fórmula de Newton-Raphson,³⁸

$$x_{i+1} = x_i - \frac{f(x_i)}{f'(x_i)}$$

En las tres tablas siguientes observamos la rapidez y eficiencia de este método para cualquier situación inicial.

	X	$f'(X)$	$f(X)$	<i>Newton-Raphson</i>	ϵ_a	ϵ_v
1	10000	0,00	-0,4799862	62563,9099		19,1762%
2	62563,9099	0,00	0,18720716	53743,9854	16,4110%	2,3754%
3	53743,9854	0,00	0,02059517	52516,5965	2,3371%	0,0373%
4	52516,5965	0,00	0,00031876	52496,9976	0,0373%	0,0000%
5	52496,9976	0,00	7,878E-08	52496,9927	0,0000%	0,0000%
6	52496,9927	0,00	4,774E-15	52496,9927	0,0000%	0,0000%
7	52496,9927	0,00	0	52496,9927	0,0000%	0,0000%
8	52496,9927	0,00	0	52496,9927	0,0000%	0,0000%
9	52496,9927	0,00	0	52496,9927	0,0000%	0,0000%

Tabla 30 Valor inicial muy pequeño. Con 4 iteraciones llega a una aproximación de la unidad .

³⁸ Este método está basado en las series de Taylor.

	X	$f'(X)$	$f(X)$	<i>Newton-Raphson</i>	\mathcal{E}_a	\mathcal{E}_v
1	300000	0,00	102,569097	223907,6070		326,5151%
2	223907,6070	0,00	32,622109	166244,0416	34,6861%	216,6735%
3	166244,0416	0,00	10,4077894	122313,2686	35,9166%	132,9910%
4	122313,2686	0,00	3,31456708	89108,2823	37,2636%	69,7398%
5	89108,2823	0,00	1,01994851	66015,5754	34,9807%	25,7512%
6	66015,5754	0,00	0,26406851	54705,6097	20,6742%	4,2071%
7	54705,6097	0,00	0,03693196	52558,4406	4,0853%	0,1171%
8	52558,4406	0,00	0,00099968	52497,0403	0,1170%	0,0001%
9	52497,0403	0,00	7,7402E-07	52496,9927	0,0001%	0,0000%
10	52496,9927	0,00	4,6485E-13	52496,9927	0,0000%	0,0000%
11	52496,9927	0,00	0	52496,9927	0,0000%	0,0000%

Tabla 31 Valor inicial muy grande. 9 iteraciones con precisión de la unidad de TEU.

	X	$f'(X)$	$f(X)$	<i>Newton-Raphson</i>	\mathcal{E}_a	\mathcal{E}_v
1	52500	0,00	4,8889E-05	52496,9928		0,0000%
2	52496,9928	0,00	1,8539E-09	52496,9927	0,0000%	0,0000%
3	52496,9927	0,00	0	52496,9927	0,0000%	0,0000%

Tabla 32 Valor inicial del orden del valor verdadero. 1 iteración para llegar a una precisión de unidad de TEU.

Es indudable la eficiencia y rapidez de este método, el único problema que se puede presentar es que la naturaleza de la función dificulte el cálculo de la derivada.

Por último haremos la misma prueba de velocidad y convergencia con el método de la Secante modificado. Es interesante analizar este método dado que en algunas ecuaciones es algo engorroso³⁹ el cálculo de la primera derivada y la aproximamos mediante una diferencia dividida finita regresiva.

Esta es la fórmula del método de la secante modificado,

$$x_{i+1} = x_i - \frac{\delta x_i f(x_i)}{f(x_i + \delta x_i) - f(x_i)}$$

³⁹ En el siguiente apartado la utilizaremos para el cálculo del umbral del beneficio, dada la dificultad para hallar la primera derivada.

UMBRALES DE PRODUCCION

Como vemos este método utiliza un solo valor inicial pero necesita de una pequeña perturbación fraccionaria sobre el valor inicial de la raíz.

$\Delta x = I$						
	X	$f(x+\Delta x)$	$f(X)$	<i>Secante modificado</i>	ϵ_a	ϵ_v
1	10000	-0,47997707	-0,4799862	9999,5000		80,9522%
2	9999,5000	-0,47998163	-0,47999076	62563,9099	84,0171%	19,1762%
3	62563,9099	0,18722838	0,18720716	53744,1064	16,4107%	2,3756%
4	53744,1064	0,02061398	0,0205972	52516,6160	2,3373%	0,0374%
5	52516,6160	0,00033534	0,00031908	52496,9978	0,0374%	0,0000%
6	52496,9978	1,6339E-05	8,296E-08	52496,9927	0,0000%	0,0000%
7	52496,9927	1,6256E-05	1,0515E-12	52496,9927	0,0000%	0,0000%
8	52496,9927	1,6256E-05	0	52496,9927	0,0000%	0,0000%

Tabla 33 Valor inicial muy pequeño. Con 5 iteraciones ya llega a una aproximación de la unidad.

$\Delta x = I$						
	X	$f(x+\Delta x)$	$f(X)$	<i>Secante modificado</i>	ϵ_a	ϵ_v
1	300000	102,570445	102,569097	299999,5000		471,4604%
2	299999,5000	102,569771	102,568423	223907,6070	33,9836%	326,5151%
3	223907,6070	32,6226748	32,622109	166244,4217	34,6858%	216,6742%
4	166244,4217	10,4081164	10,4078794	122313,9395	35,9162%	132,9923%
5	122313,9395	3,31473388	3,31463405	89109,1492	37,2631%	69,7414%
6	89109,1492	1,02003096	1,0199868	66016,4196	34,9803%	25,7528%
7	66016,4196	0,26411157	0,26408822	54706,0319	20,6748%	4,2079%
8	54706,0319	0,03695642	0,03693922	52558,4919	4,0860%	0,1171%
9	52558,4919	0,0010168	0,00100052	52497,0412	0,1171%	0,0001%
10	52497,0412	1,7044E-05	7,8792E-07	52496,9927	0,0001%	0,0000%
11	52496,9927	1,6256E-05	1,0417E-11	52496,9927	0,0000%	0,0000%
12	52496,9927	1,6256E-05	0	52496,9927	0,0000%	0,0000%

Tabla 34 Valor inicial muy grande. Necesita 10 iteraciones para una precisión de la unidad de TEU.

$\Delta x = I$	X	$f(x+\Delta x)$	$f(X)$	Secante modificado	\mathcal{E}_a	\mathcal{E}_v
1	52500	6,5146E-05	4,8889E-05	52499,5713		0,0049%
2	52499,5713	5,8176E-05	4,1919E-05	52496,9928	0,0049%	0,0000%
3	52496,9928	1,6258E-05	1,8916E-09	52496,9927	0,0000%	0,0000%
4	52496,9927	1,6256E-05	2,387E-14	52496,9927	0,0000%	0,0000%
5	52496,9927	1,6256E-05	0	52496,9927	0,0000%	0,0000%

Tabla 35 Valor inicial del orden del valor verdadero. 2 iteraciones para llegar a una precisión de unidad de TEU.

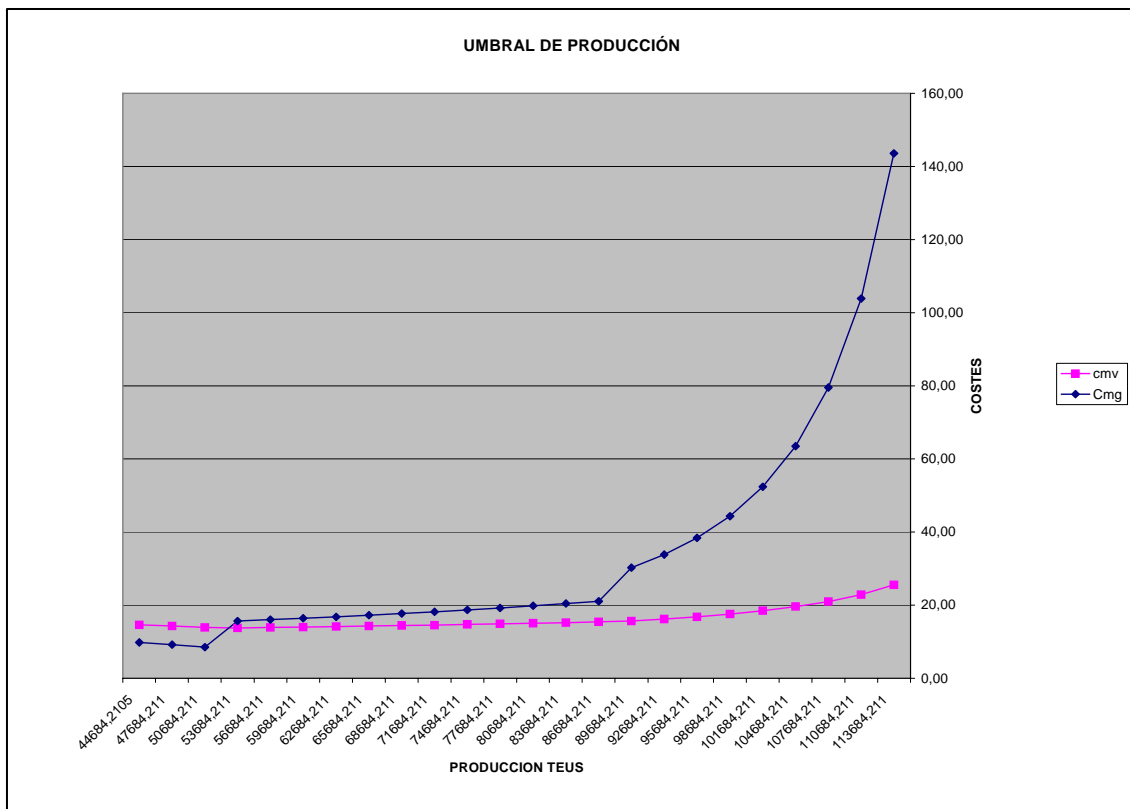


Gráfico 33 Umbral de Producción

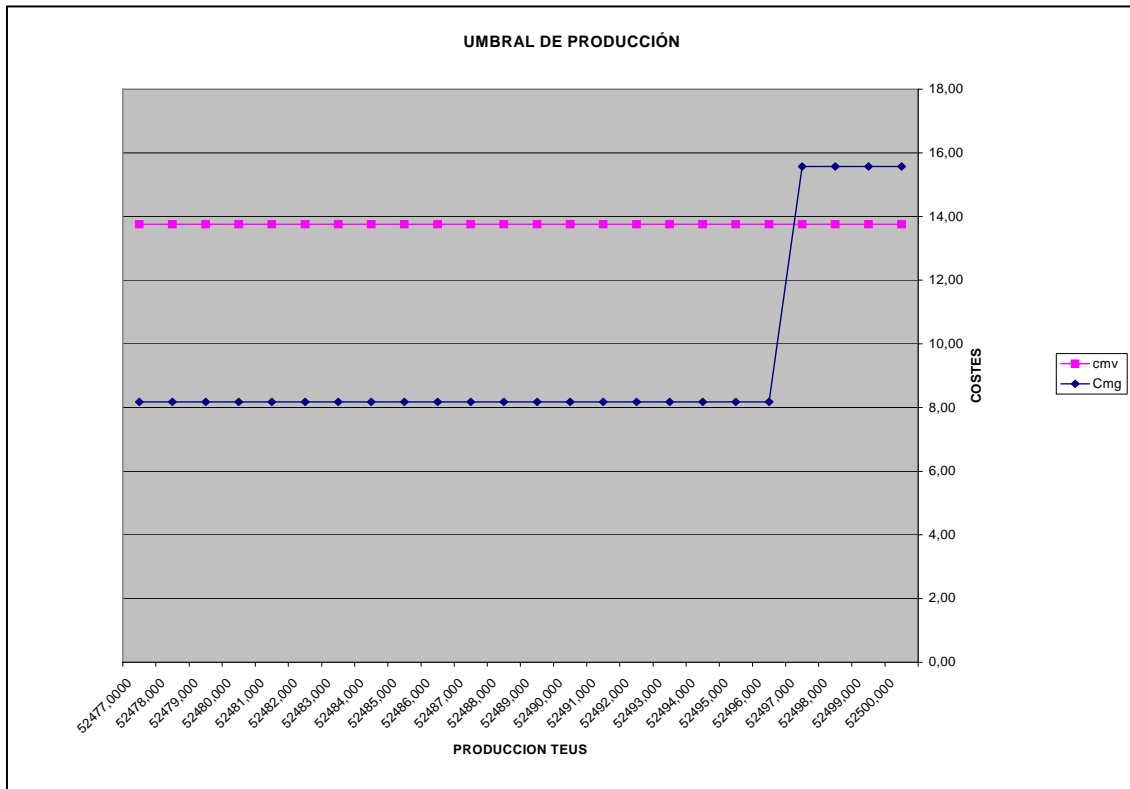


Gráfico 34 Zoom del umbral de producción, $x_p = 52496.9966$; $f_p = 6.2675E-08$

La decisión de la magnitud del incremento de producción (Δx) es importante, si es muy pequeño el número de iteraciones puede ser muy grande siendo el cálculo poco eficiente, y si es muy grande puede pasarse de intervalo y ser divergente.

La conclusión es que para el cálculo del umbral de la producción el método más rápido y eficiente es el de Newton-Raphson, también hemos observado que en caso de problemas con la primera derivada el método de la secante modificado es lo suficientemente rápido y eficiente como para sustituirlo, en cuanto al método de iteración simple de punto fijo es el que tiene más riesgos de ser divergente y también el que más iteraciones necesita para encontrar la raíz aunque en casos en que no necesite una gran potencia de cálculo puede ser utilizado dada su sencillez.

5.4.3 Cálculo del umbral del beneficio

Como ya sabemos para el cálculo del Umbral del Beneficio deberemos de tener en cuenta los tres supuestos de corte:

1. siendo $x_b < x_c$
2. siendo $x_b = x_c$
3. cuando $x_b > x_c$

El segundo y tercer caso son inmediatos, su valor viene dado de forma directa por las expresiones 5-12 y 5-13 respectivamente. Calcularemos primeramente el umbral del

beneficio en estos dos casos y por último analizaremos que método es el más idóneo para el cálculo de la raíz en el primer caso, $x_b < x_c$, donde el valor de la producción viene dado de forma implícita.

Considerando los parámetros iniciales del apartado 5-4 nos encontramos en el segundo caso que la producción correspondiente al umbral del beneficio se corresponde con la producción crítica pudiendo expresarse mediante la expresión 5-13,

$$x_b = \frac{T \cdot O_c}{e}$$

por lo que,

$$x_b = \frac{30 \cdot 28228.57}{9.5} = 89142.86 \text{ TEUS}$$

Si observamos el gráfico siguiente para los parámetros dados inicialmente vemos que el umbral del beneficio se halla en el punto de singular que genera la producción crítica 89142.86 TEUS para una estancia de 9,5 días.

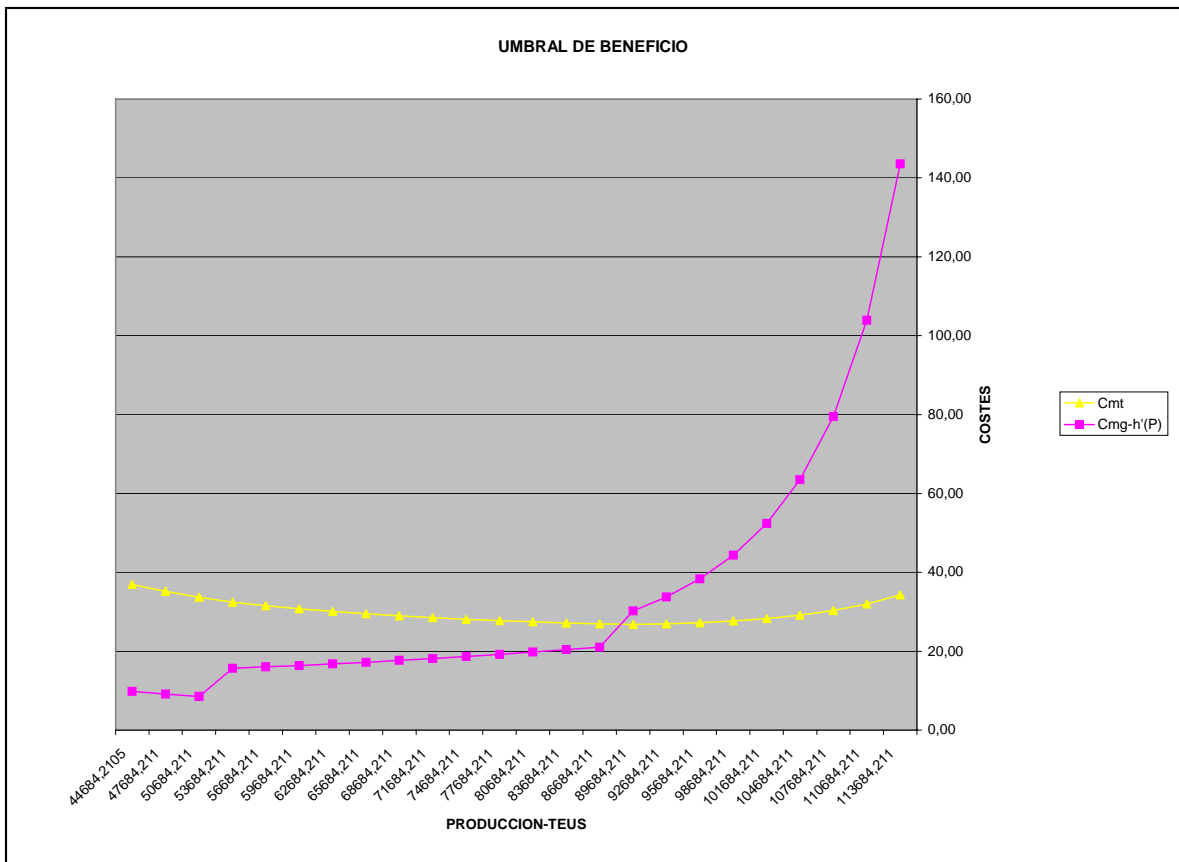


Gráfico 35 Umbral del beneficio.

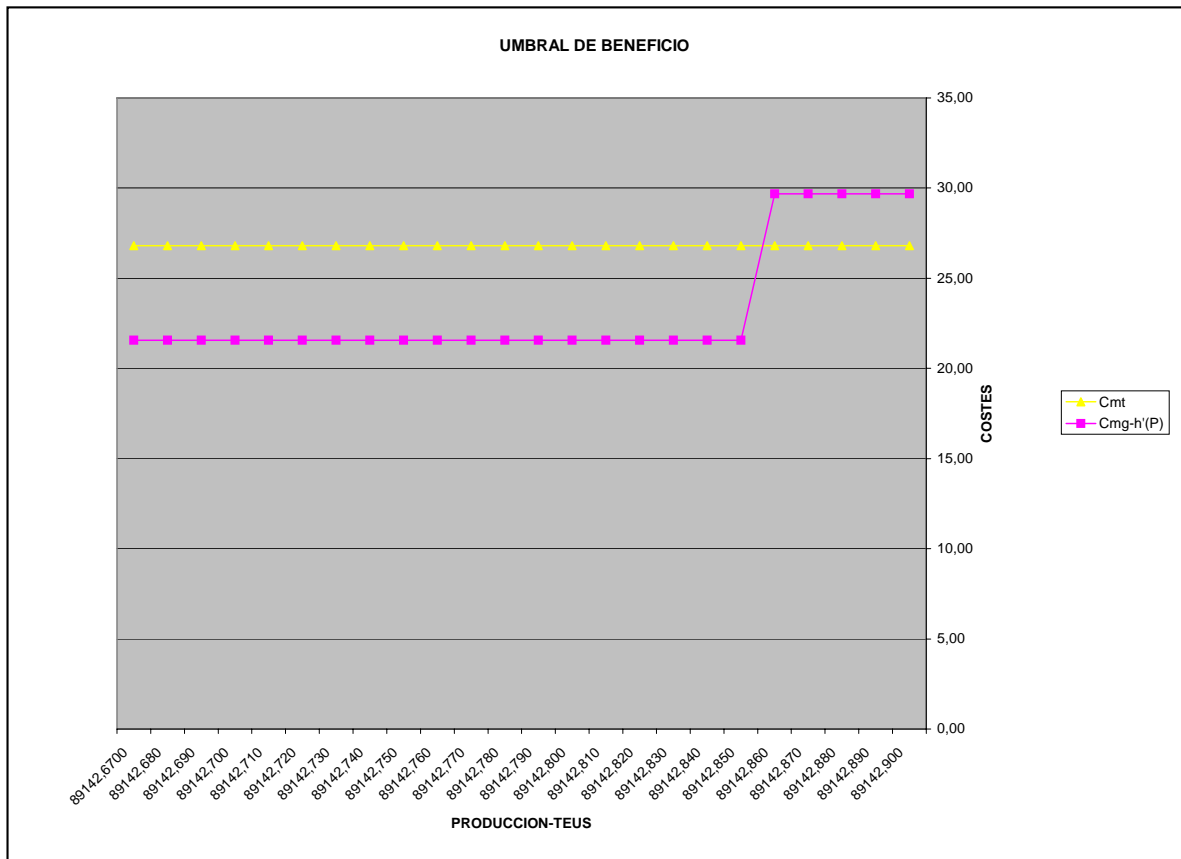


Gráfico 36 Zoom del Umbral del Beneficio, $x_b = 89142.86$ TEUS

Igualmente cuando el umbral del beneficio está por encima de la producción crítica su valor viene dado de forma directa por la ecuación 5-12,

$$x = \frac{K_2 \cdot (0,2 - 0,8 \cdot \operatorname{tg}\theta)}{-\operatorname{tg}\theta \left(\frac{e}{T \cdot S_G \cdot N} \right) \cdot \left(\sqrt{\frac{-1}{\operatorname{tg}\theta \left(\frac{e}{T \cdot S_G \cdot N} \right)} + K_2 \cdot 0,8} \right)}$$

en este caso donde $x_b > x_c$ como podemos ver en el gráfico siguiente, hemos considerado una estancia de 16 días estando el umbral del beneficio en 55272.88 TEUS.

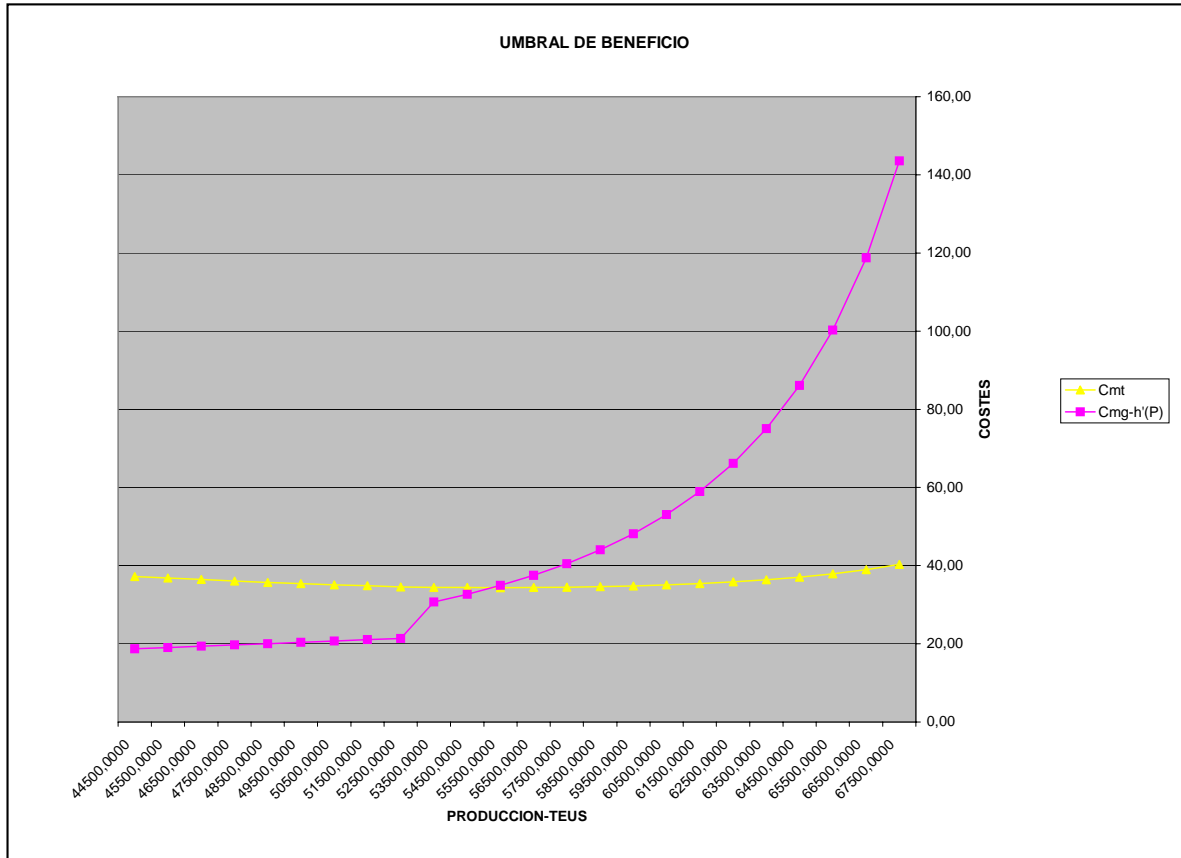


Gráfico 37 Para una estancia de 16 días x=55272,88

Finalmente cambiemos el valor de la estancia a 4.5 días para conseguir un corte por debajo de la producción crítica, es decir, para encontrarnos en el primer caso donde utilizaremos la ecuación 5-11, aquí hallaremos las raíces utilizando los métodos de iteración de Punto Fijo y de la Secante modificado. Obviaremos el método de Newton-Raphson por las razones expuestas en el apartado anterior.

$$\frac{x \cdot \sqrt{A \cdot (p+1)x^p + B} - 0.8 \cdot K_2}{1 + Ax^{p+1} + Bx - C} - 0.2 \cdot K_2 = 0$$

de donde,

$$x_1 = \frac{0.2 \cdot K_2 \cdot (1 + Ax_0^{p+1} + Bx_0 - C + 4)}{\sqrt{A \cdot (p+1)x_0^p + B}}$$

aquí el valor de (x) viene dado de forma implícita, igual que con el umbral de producción predecimos el valor de (x) en función de su valor anterior, observemos en

las tablas siguientes el comportamiento de la iteración de Punto Fijo en función de la dimensión de su valor inicial.

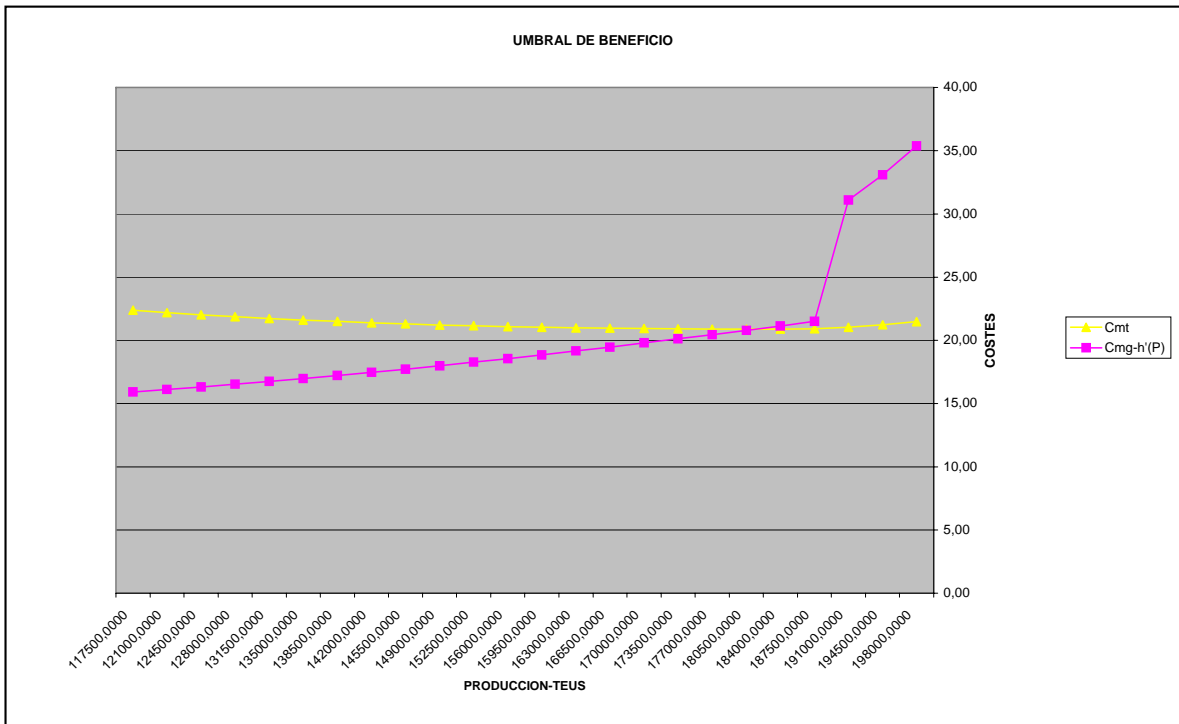


Gráfico 38 Umbral del Beneficio para una estancia de 4.5 días.

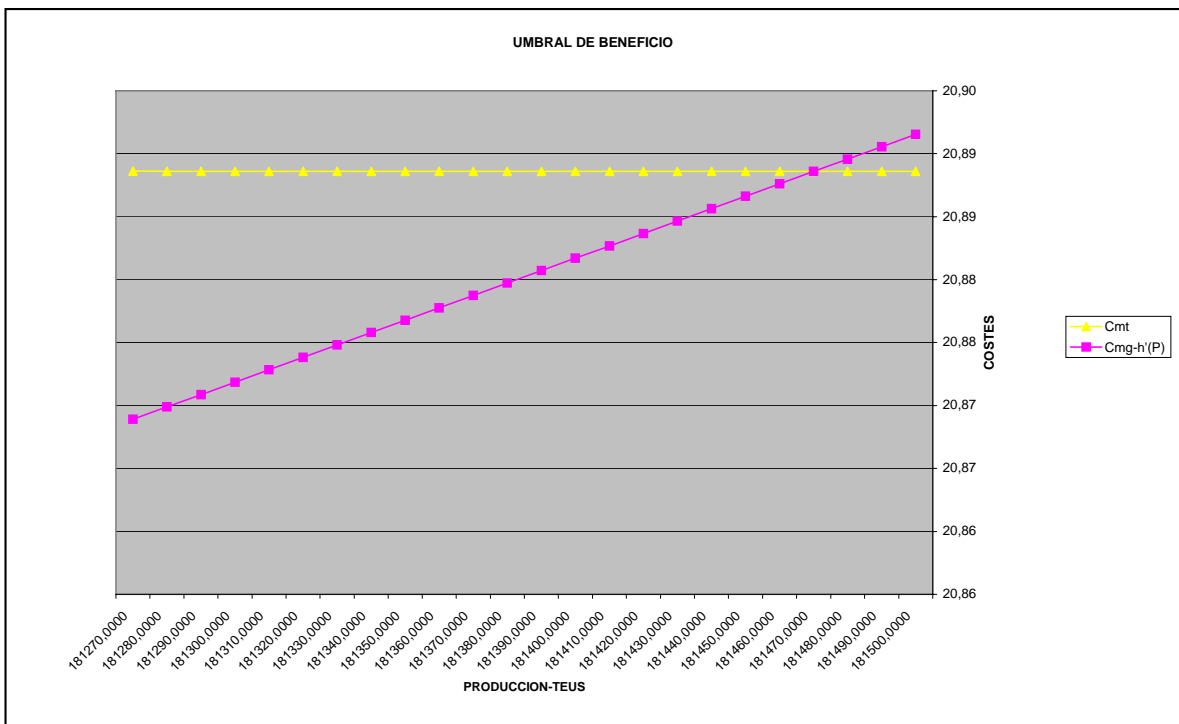


Gráfico 39 Zoom del Ub para 4.5 días.

UMBRALES DE PRODUCCION

	X	$f(X)$	<i>punto fijo</i>	\mathcal{E}_a	\mathcal{E}_v
1	10000	-593,4338122	299051,385		64,7937%
2	299051,385	155,7521708	165183,127	81,0423%	8,9750%
3	165183,127	-50,95811817	192870,087	14,3552%	6,2820%
4	192870,087	31,64758958	175002,689	10,2098%	3,5639%
5	175002,689	-19,49040131	185690,048	5,7555%	2,3254%
6	185690,048	12,13303155	178932,896	3,7764%	1,3982%
7	178932,896	-7,52069812	183077,628	2,2639%	0,8858%
8	183077,628	4,678014575	180483,592	1,4373%	0,5436%
9	180483,592	-2,904489412	182087,817	0,8810%	0,3404%
10	182087,817	1,80562012	181088,122	0,5520%	0,2105%
11	181088,122	-1,121666159	181708,2	0,3412%	0,1312%
12	181708,2	0,697119834	181322,459	0,2127%	0,0814%
13	181322,459	-0,433137772	181561,989	0,1319%	0,0506%
14	181561,989	0,269168166	181413,082	0,0821%	0,0314%
15	181413,082	-0,167252533	181505,588	0,0510%	0,0195%
16	181505,588	0,103932677	181448,096	0,0317%	0,0121%
17	181448,096	-0,06458218	181483,817	0,0197%	0,0075%
18	181483,817	0,040131465	181461,618	0,0122%	0,0047%
19	181461,618	-0,024937335	181475,412	0,0076%	0,0029%
20	181475,412	0,015496	181466,841	0,0047%	0,0018%
21	181466,841	-0,009629115	181472,167	0,0029%	0,0011%
22	181472,167	0,005983494	181468,857	0,0018%	0,0007%
23	181468,857	-0,00371811	181470,914	0,0011%	0,0004%
24	181470,914	0,002310417	181469,636	0,0007%	0,0003%
25	181469,636	-0,001435681	181470,43	0,0004%	0,0002%
26	181470,43	0,000892125	181469,936	0,0003%	0,0001%
27	181469,936	-0,000554362	181470,243	0,0002%	0,0001%
28	181470,243	0,000344478	181470,052	0,0001%	0,0000%
29	181470,052	-0,000214057	181470,171	0,0001%	0,0000%
30	181470,171	0,000133014	181470,097	0,0000%	0,0000%
31	181470,097	-8,26542E-05	181470,143	0,0000%	0,0000%
32	181470,143	5,13609E-05	181470,115	0,0000%	0,0000%
33	181470,115	-3,19154E-05	181470,132	0,0000%	0,0000%
34	181470,132	1,98321E-05	181470,121	0,0000%	0,0000%
35	181470,121	-1,23236E-05	181470,128	0,0000%	0,0000%

Tabla 36 Para un valor inicial pequeño. Converge lentamente.

UMBRALES DE PRODUCCION

	X	$f(X)$	punto fijo	\mathcal{E}_a	\mathcal{E}_v
1	180000	-4,337460736	182394,015		0,5091%
2	182394,015	2,696967407	180900,11	0,8258%	0,3141%
3	180900,11	-1,675115181	181825,887	0,5092%	0,1960%
4	181825,887	1,041176971	181249,663	0,3179%	0,1215%
5	181249,663	-0,646871959	181607,353	0,1970%	0,0756%
6	181607,353	0,402004077	181384,943	0,1226%	0,0469%
7	181384,943	-0,249787151	181523,092	0,0761%	0,0292%
8	181523,092	0,155222682	181437,226	0,0473%	0,0181%
9	181437,226	-0,096452211	181490,574	0,0294%	0,0113%
10	181490,574	0,059935855	181457,421	0,0183%	0,0070%
11	181457,421	-0,037243489	181478,021	0,0114%	0,0044%
12	181478,021	0,02314306	181465,22	0,0071%	0,0027%
13	181465,22	-0,014380931	181473,174	0,0044%	0,0017%
14	181473,174	0,00893626	181468,231	0,0027%	0,0010%
15	181468,231	-0,005552941	181471,303	0,0017%	0,0006%
16	181471,303	0,003450573	181469,394	0,0011%	0,0004%
17	181469,394	-0,002144168	181470,58	0,0007%	0,0003%
18	181470,58	0,001332376	181469,843	0,0004%	0,0002%
19	181469,843	-0,000827932	181470,301	0,0003%	0,0001%
20	181470,301	0,000514473	181470,016	0,0002%	0,0001%
21	181470,016	-0,000319691	181470,193	0,0001%	0,0000%
22	181470,193	0,000198654	181470,083	0,0001%	0,0000%
23	181470,083	-0,000123443	181470,152	0,0000%	0,0000%
24	181470,152	7,67068E-05	181470,109	0,0000%	0,0000%
25	181470,109	-4,76652E-05	181470,136	0,0000%	0,0000%
26	181470,136	2,96189E-05	181470,119	0,0000%	0,0000%
27	181470,119	-1,84051E-05	181470,129	0,0000%	0,0000%
28	181470,129	1,14368E-05	181470,123	0,0000%	0,0000%
29	181470,123	-7,10678E-06	181470,127	0,0000%	0,0000%
30	181470,127	4,41612E-06	181470,125	0,0000%	0,0000%
31	181470,125	-2,74415E-06	181470,126	0,0000%	0,0000%
32	181470,126	1,7052E-06	181470,125	0,0000%	0,0000%
33	181470,125	-1,05961E-06	181470,126	0,0000%	0,0000%
34	181470,126	6,58434E-07	181470,125	0,0000%	0,0000%
35	181470,125	-4,09147E-07	181470,126	0,0000%	0,0000%
36	181470,126	2,54242E-07	181470,125	0,0000%	0,0000%
37	181470,125	-1,57985E-07	181470,126	0,0000%	0,0000%
38	181470,126	9,81711E-08	181470,125	0,0000%	0,0000%
39	181470,125	-6,10031E-08	181470,125	0,0000%	0,0000%
40	181470,125	3,7907E-08	181470,125	0,0000%	0,0000%
41	181470,125	-2,35553E-08	181470,125	0,0000%	0,0000%

UMBRALES DE PRODUCCION

42	181470,125	1,46372E-08	181470,125	0,0000%	0,0000%
43	181470,125	-9,09557E-09	181470,125	0,0000%	0,0000%
44	181470,125	5,65196E-09	181470,125	0,0000%	0,0000%
45	181470,125	-3,51206E-09	181470,125	0,0000%	0,0000%
46	181470,125	2,18235E-09	181470,125	0,0000%	0,0000%
47	181470,125	-1,35611E-09	181470,125	0,0000%	0,0000%
48	181470,125	8,42633E-10	181470,125	0,0000%	0,0000%
49	181470,125	-5,23585E-10	181470,125	0,0000%	0,0000%
50	181470,125	3,25471E-10	181470,125	0,0000%	0,0000%

Tabla 37 Valor inicial próximo al verdadero.

	X	$f(X)$	punto fijo	ϵ_a	ϵ_v
1	276000	150,4885459	160645,274		11,4756%
2	160645,274	-66,16853113	196502,281	18,2476%	8,2835%
3	196502,281	40,95582472	173197,172	13,4558%	4,5589%
4	173197,172	-25,11451677	186940,214	7,3516%	3,0143%
5	186940,214	15,63481631	178213,731	4,8966%	1,7945%
6	178213,731	-9,682316758	183544,522	2,9044%	1,1431%
7	183544,522	6,023878516	180201,682	1,8551%	0,6990%
8	180201,682	-3,739108251	182266,042	1,1326%	0,4386%
9	182266,042	2,324738218	180978,579	0,7114%	0,2709%
10	180978,579	-1,444015455	181776,728	0,4391%	0,1690%
11	181776,728	0,8975048	181280,054	0,2740%	0,1047%
12	181280,054	-0,557623377	181588,408	0,1698%	0,0652%
13	181588,408	0,346534972	181396,692	0,1057%	0,0405%
14	181396,692	-0,215323101	181515,782	0,0656%	0,0252%
15	181515,782	0,133805309	181441,765	0,0408%	0,0156%
16	181441,765	-0,083144179	181487,753	0,0253%	0,0097%
17	181487,753	0,051666072	181459,174	0,0157%	0,0060%
18	181459,174	-0,032104778	181476,932	0,0098%	0,0038%
19	181476,932	0,019949854	181465,896	0,0061%	0,0023%
20	181465,896	-0,012396702	181472,753	0,0038%	0,0014%
21	181472,753	0,007703265	181468,492	0,0023%	0,0009%
22	181468,492	-0,004786766	181471,14	0,0015%	0,0006%
23	181471,14	0,002974475	181469,495	0,0009%	0,0003%
24	181469,495	-0,001848323	181470,517	0,0006%	0,0002%
25	181470,517	0,001148539	181469,882	0,0004%	0,0001%
26	181469,882	-0,000713697	181470,277	0,0002%	0,0001%
27	181470,277	0,000443488	181470,031	0,0001%	0,0001%

UMBRALES DE PRODUCCION

28	181470,031	-0,000275581	181470,184	0,0001%	0,0000%
29	181470,184	0,000171245	181470,089	0,0001%	0,0000%
30	181470,089	-0,000106411	181470,148	0,0000%	0,0000%
31	181470,148	6,6123E-05	181470,111	0,0000%	0,0000%
32	181470,111	-4,10885E-05	181470,134	0,0000%	0,0000%
33	181470,134	2,55322E-05	181470,12	0,0000%	0,0000%
34	181470,12	-1,58656E-05	181470,129	0,0000%	0,0000%
35	181470,129	9,8588E-06	181470,123	0,0000%	0,0000%
36	181470,123	-6,12621E-06	181470,127	0,0000%	0,0000%
37	181470,127	3,8068E-06	181470,125	0,0000%	0,0000%
38	181470,125	-2,36553E-06	181470,126	0,0000%	0,0000%
39	181470,126	1,46993E-06	181470,125	0,0000%	0,0000%
40	181470,125	-9,13405E-07	181470,126	0,0000%	0,0000%
41	181470,126	5,67585E-07	181470,125	0,0000%	0,0000%
42	181470,125	-3,52695E-07	181470,126	0,0000%	0,0000%
43	181470,126	2,19163E-07	181470,125	0,0000%	0,0000%
44	181470,125	-1,36187E-07	181470,126	0,0000%	0,0000%
45	181470,126	8,46257E-08	181470,125	0,0000%	0,0000%
46	181470,125	-5,25859E-08	181470,125	0,0000%	0,0000%
47	181470,125	3,26767E-08	181470,125	0,0000%	0,0000%
48	181470,125	-2,03051E-08	181470,125	0,0000%	0,0000%
49	181470,125	1,26175E-08	181470,125	0,0000%	0,0000%
50	181470,125	-7,8404E-09	181470,125	0,0000%	0,0000%

Tabla 38 Valor inicial grande, converge lentamente.

Probemos ahora el método de la secante modificado, obviamos el método de Newton-Raphson dado que el cálculo de la primera derivada de esta función no es eficiente por el tamaño de la ecuación y la cantidad de operaciones que contiene.

$\Delta x = l$						
	X	$f(x+\Delta x)$	$f(X)$	Secante modificado	ϵ_a	ϵ_v
1	10000	-593,429757	-593,433812	156343,2285		13,8463%
2	156343,2285	-80,9187978	-80,9222618	179704,3585	12,9998%	0,9730%
3	179704,3585	-5,21348661	-5,21646359	181456,6241	0,9657%	0,0074%
4	181456,6241	-0,03664695	-0,03957857	181470,1247	0,0074%	0,0000%
5	181470,1247	0,00292906	-2,208E-06	181470,1255	0,0000%	0,0000%
6	181470,1255	0,00293127	9,8623E-12	181470,1255	0,0000%	0,0000%
7	181470,1255	0,00293127	0	181470,1255	0,0000%	0,0000%

Tabla 39 Para valores iniciales pequeños converge rápidamente.

$\Delta x =$	I					
	X	$f(x+\Delta x)$	$f(X)$	<i>Secante modificado</i>	ϵ_a	ϵ_v
1	180000	-4,3344913	-4,33746074	181460,7207		0,0052%
2	181460,7207	-0,0246376	-0,02756912	181470,1251	0,0052%	0,0000%
3	181470,1251	0,00293023	-1,0341E-06	181470,1255	0,0000%	0,0000%
4	181470,1255	0,00293127	4,6043E-12	181470,1255	0,0000%	0,0000%
5	181470,1255	0,00293127	0	181470,1255	0,0000%	0,0000%

Tabla 40 Número de iteraciones para valores iniciales del orden del verdadero. Converge muy rápidamente.

$\Delta x =$	I					
	X	$f(x+\Delta x)$	$f(X)$	<i>Secante modificado</i>	ϵ_a	ϵ_v
1	276000	150,488962	150,488546	-85449,7289		147,0875%
2	-85449,7289	-1129,60389	-1129,60863	152463,4788	156,0460%	15,9843%
3	152463,4788	-94,4679757	-94,4714949	179307,6734	14,9710%	1,1916%
4	179307,6734	-6,39641723	-6,39940434	181450,0105	1,1807%	0,0111%
5	181450,0105	-0,05603611	-0,05896791	181470,1238	0,0111%	0,0000%
6	181470,1238	0,00292624	-5,0294E-06	181470,1255	0,0000%	0,0000%
7	181470,1255	0,00293127	2,2396E-11	181470,1255	0,0000%	0,0000%
8	181470,1255	0,00293127	0	181470,1255	0,0000%	0,0000%

Tabla 41 Número de iteraciones para valores iniciales grandes. Converge rápidamente.

Observando las tablas anteriores vemos que el método de la secante modificado converge más rápidamente (4; 2 y 5 iteraciones) que el método de iteración de punto fijo (25; 19 y 26 iteraciones).

Como hemos comentado en el apartado anterior la decisión de la magnitud del incremento de producción (Δx) es importante para que el método converja con mayor rapidez, esto es, aunque sea convergente siempre podemos optimizarlo en función de este incremento.

5.4.4 Cálculo del punto de equilibrio

Igual que sucedía con el umbral del beneficio cuando la producción correspondiente al punto de equilibrio se encuentra en el punto crítico o por encima de él su cálculo es inmediato mediante las expresiones 5-19 y 5-18 respectivamente. Si consideramos los parámetros iniciales es decir una estancia de 9,5 días y 80 euros por TEU encontramos que el punto de equilibrio se encuentra en 107753,442 TEUS, valor que hemos encontrado mediante la siguiente expresión,

$$x = \frac{\sqrt{K_3 \cdot \frac{0.2 + 0.8 \cdot (-tg\theta)}{K_4} + 0.8tg\theta - 0.2}}{0.8 \cdot tg\theta \left(\frac{e}{T \cdot S_G \cdot N} \right)}$$

ésta es la ecuación 5-18 que utilizamos en el tercer caso, cuando el punto de corte está por encima del punto crítico $x_q > x_c$.

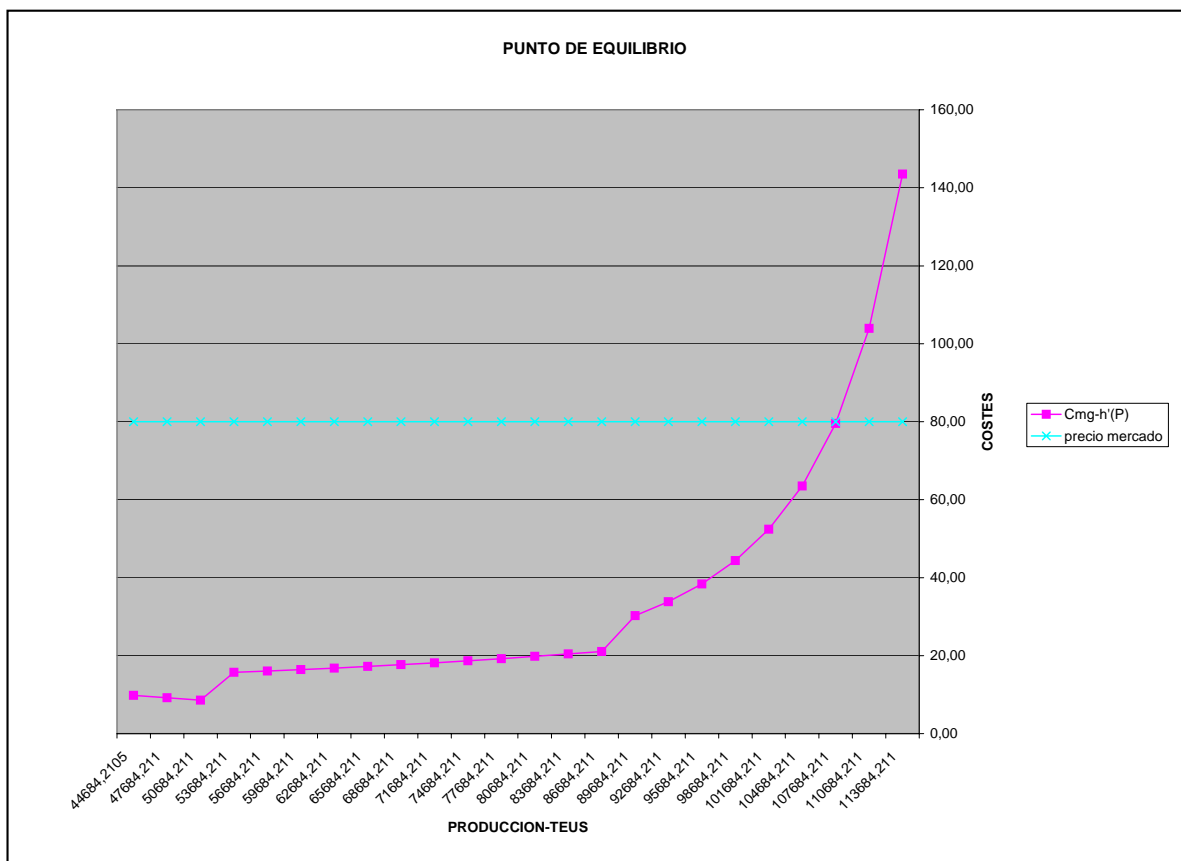


Gráfico 40 Punto de Equilibrio 107753,442 TEUs, para e = 9,5 días y w = 80 euros

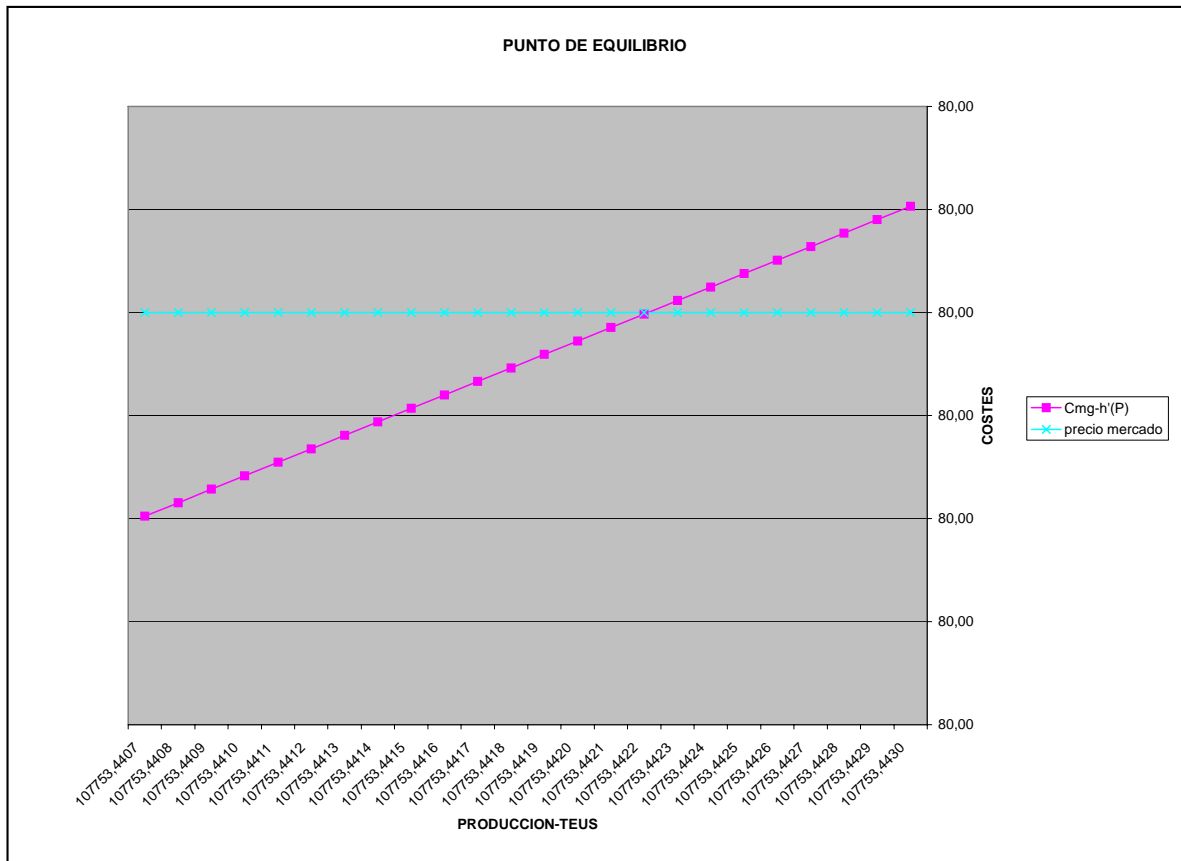


Gráfico 41 Zoom del Punto de Equilibrio, 107753.442 TEUs

En el segundo caso, cuando coincide con la producción crítica $x_b=x_c$ utilizaremos la ecuación 5-19 siendo su cálculo inmediato.

$$x_q = \frac{T \cdot O_c}{e}$$

En cambio cuando el punto de corte esté por debajo del punto crítico $x_q < x_c$, utilizaremos el método de la secante modificado más directo, sencillo y eficiente que la iteración de punto fijo⁴⁰ y con una eficiencia similar al método de Newton-Raphson pero con menos requisitos de cálculo. Esta es la ecuación 5-15, que utilizaremos en este caso,

$$\frac{0.2 + \frac{0.8}{f(x)} \cdot \left(\frac{g(x)}{f(x)} + 1 \right)}{\left(0.2 + \frac{0.8}{f(x)} \right)^2} + \frac{K_4}{K_3} = 0$$

⁴⁰ En este caso la función de punto fijo además de ser menos precisa requiere de mucho más cálculo.

UMBRALES DE PRODUCCION

aquí consideramos una estancia de 9,5 días, igual que en las condiciones iniciales, pero el precio de mercado lo bajamos hasta 20 euros por TEU para conseguir que el corte esté por debajo del punto crítico.

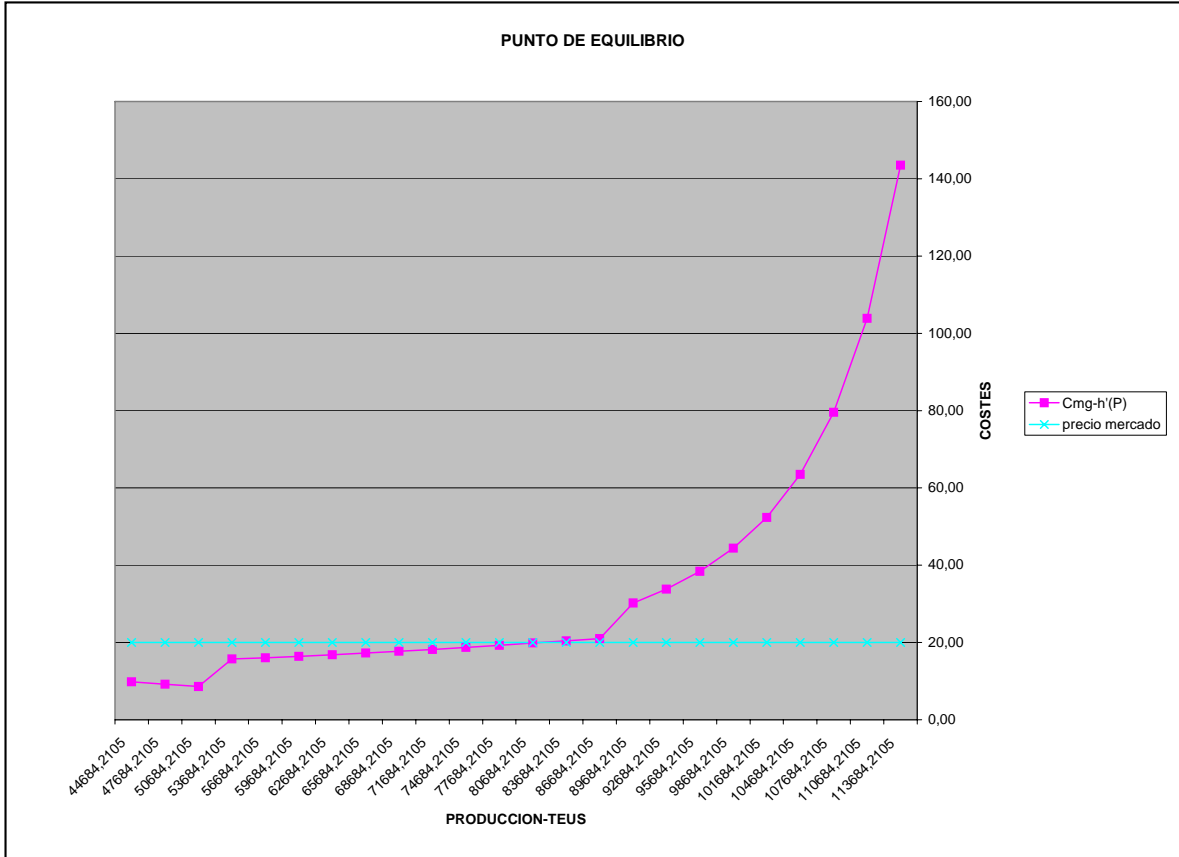


Gráfico 42 Punto de equilibrio 81587,4819 TEUs, para $e = 9,5$ días y $w = 20$ Euros.

Observemos en las tablas siguientes el grado de convergencia usando el método de la secante modificado.

$\Delta x = l$						
	X	$f(x+\Delta x)$	$f(X)$	<i>Secante modificado</i>	ϵ_a	ϵ_v
1	80000	-0,09543079	-0,0954903	81604,5047		0,0209%
2	81604,5047	0,00109548	0,00103469	81587,4838	0,0209%	0,0000%
3	81587,4838	6,0894E-05	1,1758E-07	81587,4819	0,0000%	0,0000%
4	81587,4819	6,0776E-05	7,4429E-13	81587,4819	0,0000%	0,0000%
5	81587,4819	6,0776E-05	0	81587,4819	0,0000%	0,0000%
6	81587,4819	6,0776E-05	0	81587,4819	0,0000%	0,0000%

Tabla 42 Número de iteraciones para valores similares al real, converge rápidamente.

En el caso de valores similares al real con solo 3 iteraciones ya tenemos una aproximación a la unidad de TEU, como podemos ver en la tabla anterior. Veamos que sucede cuando el valor es mayor que el real.

$\Delta x = l$						
	X	$f(x+\Delta x)$	$f(X)$	<i>Secante modificado</i>	ϵ_a	ϵ_v
1	137000	3,14905914	3,14902832	34836,6975		57,3014%
2	34836,6975	-1,79956548	-1,79958469	128509,8263	72,8918%	57,5117%
3	128509,8263	2,83866049	2,83861823	61347,4170	109,4788%	24,8078%
4	61347,4170	-1,03789768	-1,03793851	86767,7446	29,2970%	6,3493%
5	86767,7446	0,32428133	0,32421712	81718,5053	6,1788%	0,1606%
6	81718,5053	0,00803052	0,00796964	81587,5904	0,1605%	0,0001%
7	81587,5904	6,7372E-05	6,5958E-06	81587,4819	0,0001%	0,0000%
8	81587,4819	6,0776E-05	4,614E-11	81587,4819	0,0000%	0,0000%
9	81587,4819	6,0776E-05	0	81587,4819	0,0000%	0,0000%

Tabla 43 Número de iteraciones para valores mayores que el real.

En este caso para valores mayores que 137000 TEUS la función diverge sea cual sea el incremento que utilicemos. Pero considerando que un operador o diseñador de terminales siempre tiene una aproximación mucho mayor al valor buscado, podemos decir que este método nos permite entrar con un valor mucho mayor y con solo 7 iteraciones tener una aproximación de la unidad de TEU. Veamos a continuación que sucede con valores mucho más pequeños que el buscado.

$\Delta x = I$						
	X	$f(x+\Delta x)$	$f(X)$	<i>Secante modificado</i>	E_a	ϵ_v
1	31000	-1,86989911	-1,86991663	137753,6322		68,8416%
2	137753,6322	3,17190612	3,17187631	31350,8464	339,3937%	61,5740%
3	31350,8464	-1,86372925	-1,8637469	136914,1612	77,1018%	67,8127%
4	136914,1612	3,14640839	3,14637745	35218,3996	288,7575%	56,8336%
5	35218,3996	-1,79219626	-1,79221566	127594,8762	72,3983%	56,3903%
6	127594,8762	2,79943833	2,79939486	63197,6307	101,8982%	22,5400%
7	63197,6307	-0,9605409	-0,96058369	85646,2948	26,2109%	4,9748%
8	85646,2948	0,25262844	0,25256488	81672,9581	4,8649%	0,1048%
9	81672,9581	0,00525854	0,0051977	81587,5283	0,1047%	0,0001%
10	81587,5283	6,3601E-05	2,8242E-06	81587,4819	0,0001%	0,0000%
11	81587,4819	6,0776E-05	1,865E-11	81587,4819	0,0000%	0,0000%
12	81587,4819	6,0776E-05	0	81587,4819	0,0000%	0,0000%

Tabla 44 Número de iteraciones para valores más pequeños que el buscado

Igual que antes para valores inferiores a 31000 TEUs la función diverge, pero consideramos que el margen de error en los valores iniciales es suficientemente grande como para poder utilizar este método con garantías.

5.5 Análisis de sensibilidad

Utilizando la serie de Taylor podemos calcular el error de propagación de una función multivariable, despreciando las derivadas de segundo orden o superior, tendremos,

$$\Delta f(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_n) \cong \frac{\partial f}{\partial x_1} \cdot \Delta \tilde{x}_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} \cdot \Delta \tilde{x}_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n} \cdot \Delta \tilde{x}_n$$

esta expresión⁴¹ nos permite analizar la sensibilidad del índice de ocupación y de la producción máxima diaria en función de los parámetros e , S , es decir de la estancia y de las huellas o *slot grounds*. Sabemos que el índice de ocupación y la producción máxima son respectivamente,

$$I_x = \frac{e}{T \cdot S_G \cdot N} \cdot x$$

$$x_M = \frac{T \cdot S_G \cdot N}{e};$$

si dividimos por el periodo T obtendremos la producción diaria máxima,

$$x_{Md} = \frac{S_G \cdot N}{e}$$

a partir de las expresiones anteriores podemos calcular como influyen las variaciones de la estancia y de las huellas aislada o conjuntamente en el índice de ocupación y la producción máxima diaria, utilizando la serie de Taylor multivariable truncada obtendremos una aproximación de primer orden que, como veremos es suficientemente precisa.

En primer lugar analizaremos la sensibilidad en el punto del índice de ocupación con respecto a la estancia y al número de huellas que son los parámetros que más fácilmente podemos alterar. Entonces hallando las primeras derivadas parciales,

$$\Delta I_x(\tilde{e}, \tilde{S}) \cong \frac{\partial I}{\partial e} \cdot \Delta \tilde{e} + \frac{\partial I}{\partial S} \cdot \Delta \tilde{S}$$

de donde,

$$\Delta I_x(\tilde{e}, \tilde{S}) \cong \frac{x}{T \cdot S_G \cdot N} \cdot \Delta \tilde{e} - \frac{e \cdot x}{T \cdot S_G^2 \cdot N} \cdot \Delta \tilde{S}$$

⁴¹ Aproximación de primer orden.

de estas expresiones podemos calcular la siguiente tabla.

variación del índice de ocupación						
Producción = 60000 TEUS; e = 10 días; S _G = 12000 TEUS						
S _G \ e	0	0,5	1	2	3	4
0	0,00%	2,78%	5,56%	11,11%	16,67%	22,22%
100	-0,46%	2,31%	5,09%	10,65%	16,20%	21,76%
200	-0,93%	1,85%	4,63%	10,19%	15,74%	21,30%
300	-1,39%	1,39%	4,17%	9,72%	15,28%	20,83%
400	-1,85%	0,93%	3,70%	9,26%	14,81%	20,37%
500	-2,31%	0,46%	3,24%	8,80%	14,35%	19,91%
600	-2,78%	0,00%	2,78%	8,33%	13,89%	19,44%
700	-3,24%	-0,46%	2,31%	7,87%	13,43%	18,98%
800	-3,70%	-0,93%	1,85%	7,41%	12,96%	18,52%
900	-4,17%	-1,39%	1,39%	6,94%	12,50%	18,06%
1000	-4,63%	-1,85%	0,93%	6,48%	12,04%	17,59%

Tabla 45 Sensibilidad del índice de ocupación con respecto a e, S_G

Igualmente si hallamos las primeras derivadas parciales de la expresión de la producción diaria máxima tendremos,

$$\Delta x(\tilde{e}, \tilde{S}_G) \cong \frac{\partial x}{\partial e} \cdot \Delta \tilde{e} + \frac{\partial x}{\partial S_G} \cdot \Delta \tilde{S}_G$$

de donde,

$$\Delta x(\tilde{e}, \tilde{S}_G) \cong -\frac{S_g \cdot N}{e^2} \cdot \Delta \tilde{e} + \frac{N}{e} \cdot \Delta \tilde{S}_G$$

de donde calculamos la siguiente tabla.

variación de la producción diaria máxima						
Producción = 60000 TEUS; e = 10 días; S _G = 12000 TEUS						
S _G \ e	0	0,5	1	2	3	4
0	0,0	-180,0	-360,0	-720,0	-1080,0	-1440,0
100	30,0	-150,0	-330,0	-690,0	-1050,0	-1410,0
200	60,0	-120,0	-300,0	-660,0	-1020,0	-1380,0
300	90,0	-90,0	-270,0	-630,0	-990,0	-1350,0
400	120,0	-60,0	-240,0	-600,0	-960,0	-1320,0
500	150,0	-30,0	-210,0	-570,0	-930,0	-1290,0
600	180,0	0,0	-180,0	-540,0	-900,0	-1260,0
700	210,0	30,0	-150,0	-510,0	-870,0	-1230,0
800	240,0	60,0	-120,0	-480,0	-840,0	-1200,0
900	270,0	90,0	-90,0	-450,0	-810,0	-1170,0
1000	300,0	120,0	-60,0	-420,0	-780,0	-1140,0

Tabla 46 Sensibilidad de la ocupación máxima con respecto a e, S_G

Con esta simplificación los errores oscilan entre el 0% y el 2% en un entorno de 2 días y 600 huellas. En las tablas anteriores también podemos observar, en ambos, casos que las funciones son mucho más sensibles a los cambios en las estancias que al número de huellas.

Por último si hallamos la sensibilidad en cualquier punto tendremos:

$$\frac{\Delta x}{\Delta e} = \frac{\partial x}{\partial e} = -\frac{S_G \cdot N}{e^2}$$

$$\frac{\Delta x}{\Delta S_G} = \frac{\partial x}{\partial S_G} = \frac{N}{e}$$

entonces,

$$\frac{\frac{\Delta x}{\Delta e}}{\frac{\Delta x}{\Delta S_G}} = \frac{\frac{S_G \cdot N}{e^2}}{\frac{N}{e}} = -\frac{S_G}{e}$$

$$e \left(\frac{\Delta x}{\Delta e} \right) = -S \left(\frac{\Delta x}{\Delta S_G} \right)$$

$$\frac{\Delta x}{\Delta e} = -\frac{S_G}{e} \frac{\Delta x}{\Delta S_G}$$

Para unos valores generales de $\left. \begin{matrix} e \approx 1 \\ S_G \approx 10^3 \end{matrix} \right\} S_G / e \approx 10^3 \rightarrow \frac{\Delta x}{\Delta e} \approx -10^3 \frac{\Delta x}{\Delta S_G}$

Esto significa que la estancia es 1000 veces más sensible que las huellas, esto es por cada día de incremento de estancia se pierden 1000 huellas.

5.6 Conclusiones

El umbral del beneficio nunca se encontrará antes del umbral de producción, en ese tramo la empresa no recupera los costes variables y por supuesto tampoco los fijos (umbral del beneficio), motivo por el cual dejaría de producir.

Puede ocurrir que el punto de equilibrio se encuentre por debajo del umbral del beneficio, esto significa que no cubrimos los costes totales y la empresa tiene que evaluar su continuidad. En cambio cuando el punto de equilibrio se encuentra por debajo del umbral de producción significa que no cubrimos los costes variables y la empresa debe cerrar, a este precio de mercado se le llama precio de cierre.

Supongamos dos casos:

Caso A:

- Estancia 3 días
- *Slot grounds* 12000
- Punto de Equilibrio 258.360
- Producción Crítica 282.286
- Umbral del Beneficio 240.787
- Umbral de producción 166.240
- Precio de mercado por TEU 20 euros⁴² (30,67 euros por container)

Entonces tendremos los siguientes resultados:

- CT = 4.902.980 euros
- IT = 5.167.200 euros
- B = 264.220 euros
- R = 5,11 %

⁴² $\alpha \times w$ = precio por container.

Caso B:

- Estancia 3 días
- *Slots ground* 12000
- Punto de Equilibrio 291.521
- Producción Crítica 282.286
- Umbral del Beneficio 240.787
- Umbral de producción 166.240
- Precio de mercado por TEU 33 euros (50,60 euros por container)

Entonces tendremos los siguientes resultados:

- CT = 5.688.773 euros
- IT = 9.620.193 euros
- B = 3.931.420 euros
- R = 40,87 %

Observemos que en el primer caso el punto de equilibrio se encuentra por debajo del punto crítico y en el segundo por encima. Indudablemente el rendimiento operativo es superior en el primer caso pero no así el económico.

Aparentemente la conclusión sería que podemos saturar la Terminal, es decir superar la producción crítica siempre y cuando el punto de equilibrio se encuentre por encima del umbral del beneficio⁴³ y la Terminal seguiría teniendo beneficios. En realidad no es así, una vez superado el punto crítico la calidad del servicio⁴⁴ cae casi en picado, las quejas suben casi exponencialmente y la producción puede llegar a pararse.

Como veremos en las conclusiones finales el objetivo es conseguir un grado de homogenización óptimo mediante la planificación de la explanada, esto permitirá mover el punto de equilibrio hacia la derecha y en consecuencia la producción y los beneficios.

En cuanto a la sensibilidad de los parámetros, notar que cuanto más pequeña es la estancia más lejos está al umbral del beneficio, produciéndose el efecto inverso con el número de huellas (*S*) que cuanto mayor sea más lejos está el umbral del beneficio, esto quiere decir que en ambos casos la producción es mayor y por lo tanto también el beneficio. Esto es lógico, en cuanto a que una estancia pequeña favorece la rotación y el rendimiento de la explanada y al mismo tiempo cuanto mayor sea la explanada menor será el apilamiento de los containers y mayor su rendimiento.

Por último recordar que hemos simplificado el cálculo al considerar los costes de combustible conjuntamente con los costes de mano de obra portuaria y los movimientos de transferencia como una etapa más de los movimientos de buque. Como ya hemos indicado al principio de este capítulo podríamos ajustar el modelo considerando

⁴³ Y los clientes soporten un descenso de la calidad.

⁴⁴ Entendamos por calidad el rendimiento de los buques, el tiempo de servicio de los camiones, el índice de errores, etc.

términos adicionales para estos costes, mucho más simples que los costes de buque, pero para una mayor claridad en la exposición consideramos suficiente la aproximación que se obtiene al incluirlos en un modelo genérico.

6 BALANCE DEL SISTEMA

6.1 Resumen

En este capítulo y antes de las conclusiones finales haremos, a modo de propuesta, unas consideraciones generales sobre el balance de procesos.

6.2 Balance de procesos.

El sistema operativo de una terminal marítima de containers trata de equilibrar las productividades de muelle y explanada. En realidad existen tres tipos de operativa, muelle, transferencia y *Housekeeping*¹, incluyendo ferrocarril e inspección de containers en transferencia.

En operativa buque siempre hay que equilibrar los ciclos de máquina de grúas y sus máquinas de apoyo en explanada, de lo contrario cualquier rendimiento superior de la grúa con respecto a sus máquinas o viceversa produciría demoras. En cuanto a las colas de camiones habría que equilibrar servicio y coste de manera que el tiempo de espera y la longitud de la cola fuesen aceptables para todas las partes. El equilibrio entre el número de máquinas, *buffers* y puertas es determinante para la optimización del rendimiento de transferencia con puerta. Esta operativa se suele combinar con la de ferrocarril, inspecciones² y *housekeeping* intercambiando máquinas en función de las horas valle de cada proceso.

Como vemos el balance de los diferentes procesos es complejo y fundamental para que el rendimiento de una terminal sea óptimo. Como propuesta definamos un modelo básico:

Dado un sistema operativo definamos un sistema que maximice la producción diaria conjunta de la Terminal (E) mediante una ecuación de balance con las diferentes producciones, es decir muelle (A) y transferencia (T).

$$A(X_1) + T(X_2) = E \quad \text{Ecuación 6-1}$$

Las restricciones estructurales son el área de explanada y la línea de atraque; las restricciones técnicas serán el número de grúas y máquinas de explanada.

Dicho de un modo gráfico y suponiendo solamente dos variables de decisión, lo que nos permitirá trabajar con un espacio de dos dimensiones, las restricciones delimitan la “región factible” cuyas intersecciones con la ecuación de balance indican los posibles puntos de máxima eficiencia siendo el que está más alejado del origen de coordenadas el óptimo buscado.

¹ El *housekeeping* es la operativa que tiene como objetivo optimizar la estiba de los containers en explanada.

² Aduanas, sanidad, inspecciones técnicas, etc.

Por otro lado la productividad no es la misma para la Terminal que para el Armador. Para la primera lo principal es la productividad de la grúa y maquinaria de transferencia de ello dependen sus costes variables de producción, en cambio para el Armador lo principal es la productividad de Buque (movimientos x hora de carga o descarga que realiza el buque) de ello dependen sus gastos de escala, es decir el tiempo que el buque permanece en puerto operando³ y por consiguiente también afecta a la explotación del mismo o lo que es igual a su rendimiento o rotación⁴. Igualmente la productividad de transferencia⁵ para el cliente que viene a buscar la mercancía es equivalente al tiempo total de servicio⁶ mientras que para la Terminal es equivalente a la productividad de sus medios de producción⁷, es decir a sus costes variables.

En consecuencia podemos considerar que el rendimiento conjunto de una terminal es proporcional a la productividad combinada de los metros lineales de atraque y área de almacenamiento ponderados por el número de grúas y maquinaria de transferencia. Por ejemplo, en cuanto a la operativa de buque no es lo mismo tener una productividad combinada de 70 movimientos hora con dos grúas y cuatro *vancarriers* que con cuatro y ocho respectivamente. Igualmente en la transferencia por tierra⁸.

Para terminar vamos a considerar otros enfoques: Por ejemplo considerar por un lado el rendimiento de muelle por módulo ocupado, lo cual nos da una información del rendimiento de buque en relación a su eslora. Es decir un buque de 200 metros de eslora debería tener un rendimiento de buque mayor⁹ que uno de 100 metros de eslora ya que el primero podrá trabajar con el doble de grúas que el segundo. En cuanto a la explanada debemos homogenizar los diferentes tipos de maquinaria por su ciclo de producción o máquina. Por ejemplo el ciclo de un *transtainer* es de 25 movimientos por hora y para el *vancarrier* teniendo en cuenta que ha de recorrer mayores distancias, de 12 movimientos por hora¹⁰, entonces la proporción de su rendimiento es de 2 a 1 aproximadamente. Ahora podemos medir el rendimiento por hectárea que tiene una terminal ponderando con el número de máquinas y manipulantes que utiliza. Por ejemplo una terminal de 4 hectáreas y 4 *transtainers* más los camiones de apoyo necesarios que produce 100 movimientos hora es equivalente operativamente a otra de las mismas dimensiones con 8 *vancarriers*.

Otro parámetro clave es la profundidad de muelle o relación entre las hectáreas de almacenamiento y los metros lineales de atraque, a mayor profundidad menor impacto del flujo de containers sobre el área de almacenamiento y mayores recorridos de la maquinaria de apoyo a grúas de muelle. En consecuencia se trata de equilibrar metros lineales de atraque y área de almacenamiento teniendo en cuenta las restricciones de espacio y forma de la Terminal.

³ A ello hay que sumarle los tiempos de espera de atraque, maniobras y espera de grúas.

⁴ Rotación = número de viajes por periodo de explotación, pongamos por ejemplo un año.

⁵ Puerta.

⁶ Normalmente entre veinte y treinta minutos.

⁷ Cantidad de maquinaria y manipulantes que utiliza para la entrega y recepción de containers y mercancía.

⁸ Ferrocarril y puerta.

⁹ A mayor número de grúas mayor rendimiento de buque y menor rendimiento de grúa.

¹⁰ El *Transtainer* necesita el apoyo de camiones para transportar los containers entre explanada y poza, en cambio el *Vancarrier* es autónomo es decir manipula y transporta.

En mi opinión una terminal tiene que ser lo más cuadrada posible lo que proporciona flexibilidad en cuanto a las distancias a recorrer por las máquinas de explanada a la par que capacidad de absorber el flujo de containers de muelle.

En definitiva la medida del rendimiento conjunto de una terminal ha de satisfacer las necesidades de valoración tanto desde el punto de vista de la Terminal como desde el de los Clientes¹¹.

Resumiendo podríamos decir que la medida que nos da la eficiencia de una Terminal es la producción diaria en TEUS, ponderada por su capacidad estructural y parque de maquinaria.

En la tabla siguiente se resumen los parámetros descritos en los párrafos anteriores, observamos que las terminales asiáticas son las que a priori presentan mejores índices de eficiencia pero aún pudiendo considerar que así sea tengamos en cuenta que en estas terminales (Singapur y Hong Kong esencialmente) tienen una gran proporción de trasbordos lo que justifica su gran rendimiento de explanada y como consecuencia de muelle.

¹¹ Armadores, cargadores, consignatarios, transitarios, transportistas y cliente final.

	ASIA	Norte Europa	Mediter ráneo	EEUU	Orient e medio	Media
Separación entre grúas (mts)	125	165	175	185	118	154
Movimientos anuales (TEUS/ha. Superficie)	26000	11600	14000	15600	14500	16340
Movimientos anuales (TEUS/mts. Atraque)	1025	550	450	360	720	621
Movimientos anuales (TEUS/Grúa. Muelle)	120000	75000	70000	66000	80000	82200
Superficie/longitud muelle. Profundidad (mts)	569	443	367	552	657	518
Nº terminales analizadas	36	15	11	7	8	

Tabla 47 Medidas de eficiencia de las terminales marítimas de contenedores¹²

A modo de conclusión del balance expondremos un modelo donde compararemos los rendimientos de los diferentes procesos y sus grados de ocupación parciales y combinados. Consideremos una terminal con las siguientes características:

¹² Monfort A. [et al.]. Terminales marítimas de contenedores: El desarrollo de la automatización. 1ª ed. Valencia: IPEC (Fundación Instituto Portuario de Estudios y Cooperación de la Comunidad valenciana), 2001. ISBN 84-923957-3-7, p. 217-271.

BALANCE DEL SISTEMA

PRODUCCION	Hectáreas	AREA	54,0
	metros	ATRAQUE	1364,0
	días	T (periodo)	30
	uds	20'	20500
	uds	40'	29000
	uds	Producción Total	49500
	TEUS	Producción Total	78500
	TEUS	TRB%	30%
	TEUS	TRB	23550
		alfa	1,59
OCUPACION EXPLANADA	Días de ocupación	e-TEU	9
	TEUS	Huellas	10600
		N (altura máxima)	3
	TEUS	Oc-máxima	31800
	TEUS	Oc-crítica	23850
	TEUS	PROD-diaria	2617
	TEUS periodo	PROD-máxima	106000
	TEUS periodo	PROD-crítica	79500
OCUPACION GRUAS	Metros	ANCHO Grúa	27,50
	Metros (entre grúas)	HOLGURA Grúa	124,00
	Uds	GRUAS	9,00
OCUPACION MUELLE	Metros	Módulo_de atraque	50
	Uds	Buques x periodo	110
	Metros	Eslora media	220
	% de la eslora	Holgura de cabos	20%
	Horas	Tiempo de maniobra	2,50
RENDIMIENTO BUQUE	Containers x hora (grúa-bruto)	RG _B _hora	25,00
	Uds	Manos-buque por intensiva	2,00
	Ocupación de mano	Gamma	0,80
	Horas	Intensiva	6,00
	Containers	Movs x Buque	450
	Containers x hora	Ciclo de máquina (grúa)	50,00
	Containers	Movs Mano	150
MAQUINARIA Y RENDIMIENTO DE TRANSFERENCIA	Uds	VC's	40,00
	Horas	Horas al día de operaciones explanada	15,00
	Uds x hora	VC's x hora / explanada	15,00
	Uds x mano	VC's / buque	2,78
	Horas x periodo (30)	Tiempo Bruto total de VCs-buque	4400,00
	Horas x periodo (21)	Tiempo Bruto total de VCs-explanada	3850,00
	días (puerta abierta)	Tiempo Bruto (explanada)	21,00
	Containers	Operaciones x día	1650,00
MANOS	TEUS	TEUS x MANO	237,88
	Uds	MANOS x semana	189,00

Tabla 48 Características iniciales del modelo

BALANCE DEL SISTEMA

En esta tabla observamos siete grupos de datos¹³ correspondientes a la producción, rendimientos y los diferentes medios de producción:

- Producción en TEUS
- Ocupación de la explanada en TEUS
- Ocupación de grúas
- Ocupación del muelle en buques
- Ocupación de manos
- Rendimiento buque
- Ocupación de maquinaria y rendimiento de transferencia

En base a estos datos tendremos las ocupaciones y rendimientos parciales que muestran las siguientes tablas.

PRODUCCION				
	TEUS	MANOS	%	TB (horas tiempo bruto)
	78500	413	64,40%	1980,0
MAX	121900	641	100%	3074,7
OCUPACION EXPLANADA (E)				
	Ocupación TEUS	TEUS / día	% Ocupación Explanada	TEUS / Ha día
	24478,26	2275,36	64,40%	42,14
MAX	31800,00	3533,33	100%	65,43
OCUPACION MUELLE (A)				
	Ocupación Buques	Buques/día	% Ocupación Muelle	CONT / Md hora
	1,76	3,67	34,01%	11,36
MAX	5,17	10,78	100%	11,36
OCUPACIÓN GRUAS (G)				
	Ocupación	Horas	% Ocupación Grúas	CONT / Grúa día

¹³ Incluyendo variables y parámetros.

BALANCE DEL SISTEMA

	Grúas	Grúa día		
	2,75	66,00	30,54%	183,27
MAX	9,00	216,08	100%	600,00
OCUPACION MAQUINARIA (V)				
	Ocupación VC's	Horas VC's día	% Ocupación VC's	CONT / VC día
	11,46	275,00	28,65%	61,88
MAX	40	960		216,00
OCUPACION MANOS (M)				
	Ocupación MANOS	MANOS día	% Ocupación Manos	TEUS / MANO día
	2,75	11,00	55,00%	951,52
MAX	5,00	20,00	100%	951,52

Tabla 49 Ocupaciones y rendimientos parciales de los medios de producción.

En la tabla anterior la producción la medimos por el flujo total de containers a través del muelle, es decir total de movimientos de importación, exportación, trasbordos y carga descarga de equipo vacío.

Además el hecho de que una parte de la producción sean trasbordos (30% en este caso) hace que la ocupación decrezca en un 15%. Como ya sabemos, por cada dos movimientos del trasbordo (carga y descarga) solo se ha ocupado un espacio en la explanada. Es decir el grado de ocupación de explanada no es igual al de producción aunque sí proporcional y debemos de descontar la mitad de los movimientos de trasbordo.

En cuanto al muelle y ocupación de grúas consideramos la eslora y movimientos medios de los buques operados.

Se calcula la ocupación de maquinaria considerando su utilización en horas tanto en transferencia como en buque, en el caso considerado cada mano de buque utiliza 2,78 *vancarriers* y en transferencia 15 por hora de trabajo durante 15 horas diarias y 21 días (laborables) al mes.

En cuanto a las manos consideramos que la Sociedad de Estiba local (*Pool*) nos puede suministrar un total de 20 manos por día.

Finalmente tendremos la siguiente ocupación combinada:

DESVIACION ESTANDAR	16,15%		
MEDIA PONDERADA	35,55%	E+A+G+V+M	
OCUPACION CORREGIDA	51,69%		

Tabla 50 Corrección de la ocupación por desviaciones

En la tabla anterior hallamos la media ponderada de todas ocupaciones para posteriormente corregirla con más una desviación estándar. La ponderación se realiza teniendo en cuenta la producción en TEUS de cada proceso, utilizando posteriormente la desviación estándar para corregir la ocupación media ponderada. En realidad cuando un proceso se halla saturado paraliza a los demás, es por eso que le sumamos la desviación estándar a la media para tener una ocupación combinada más realista.

Veamos a continuación la incidencia del rendimiento de grúa y de maquinaria de explanada en la productividad conjunta de una Terminal.

PRODUCTIVIDAD BUQUE				
R _G	Horas Grúa Buque	Horas Buque en muelle trabajando	Total Manos Buque	RB_hora Bruto
25	18,00	9,00	3,00	50,00
20	22,50	11,25	3,75	40,00
15	30,00	15,00	5,00	30,00

Tabla 51 Incidencia de la productividad de Grúa.

La primera fila de la tabla anterior muestra los resultados para los valores predeterminados inicialmente, las dos siguientes muestran los valores correspondientes para valores de rendimiento de grúa decrecientes. La primera columna indica el rendimiento por hora de grúa, la segunda el total de horas grúa por buque, la tercera el total de horas del buque trabajando, la cuarta el total de manos utilizadas y la quinta el rendimiento de buque teniendo en cuenta que la media de manos por buque es 2.

La siguiente tabla analiza el rendimiento de máquinas de transferencia y su incidencia en la productividad de transferencia.

PRODUCTIVIDAD TRANSFERENCIA				
Horas VC expl/día	Total VC's día	RVc_hora Bruto	L	W
240,00	16,00	9,00	12,97	0,12
225,00	15,00	9,00	13,78	0,13
222,62	12,23	9,00	1551,99	14,11

Tabla 52 Productividad de transferencia tiempos de espera y número de máquinas utilizadas.

La segunda fila de la tabla de productividad de transferencia muestra los resultados para los valores predeterminados inicialmente, la tercera fila los valores en el límite¹⁴, en este punto el sistema es todavía estable con una cola de camiones de 1552 unidades y un tiempo medio de espera de 14,11 horas, con solo bajar una centésima el número de máquinas el sistema se volvería inestable con una cola y tiempo de espera crecientes. La

¹⁴ Con un grado de aproximación a la centésima de maquinas utilizadas.

primera fila muestra los resultados cuando aumentamos a 16 máquinas el número de servidores.

El óptimo para la Terminal es 12,23 máquinas, es decir un grado de utilización casi igual a uno siendo la tasa de llegadas igual a la tasa de servicio. Pero en este punto las colas son muy largas y los tiempos de espera inaceptables. La Terminal debería de ofrecer un tiempo medio de espera no superior a los treinta minutos para estar dentro de unos márgenes aceptables para los clientes, en consecuencia deberá incrementar el número de máquinas hasta un óptimo que equilibre costes y servicio.

En todos los casos anteriores ocupación, producción y estancias se han calculado por las fórmulas de *Little*.

En este apartado hemos visto la relación entre la producción, el rendimiento de buque, rendimiento de transferencia y la ocupación de los correspondientes medios de producción.

7 CONCLUSIONES FINALES

7.1 Resumen

El objetivo de esta Tesis es obtener un modelo que nos permita conocer los umbrales y punto de equilibrio de una Terminal Marítima de Contenedores. Es decir dadas unas características tanto de configuración, maquinaria, y mercado encontrar los niveles de producción a partir de los cuales los ingresos igualan los costes variables de producción, los costes totales y por último el nivel de producción donde el beneficio es máximo.

La conclusión es que el grado de homogenización de la explanada y la estancia de los containers son los factores determinantes para aumentar los umbrales y punto de equilibrio y en consecuencia para optimizar los beneficios de una Terminal Marítima de Containers.

Por último decir que difícilmente conseguiremos “cero” remociones pero mediante una planificación adecuada conseguiremos un alto grado de homogeneidad y rendimientos medios próximos al 75%.

7.2 El Modelo

El modelo nos permitirá actuar sobre las variables y parámetros más sensibles para optimizar el nivel de producción. En concreto actuaremos sobre la planificación, *layout* de la explanada y estancia¹ de los containers.

La explanada es el auténtico corazón de la eficiencia de una terminal, de la calidad de la planificación, estancias de los containers y *layout* dependen los rendimientos tanto de buque como de transferencia y en consecuencia la optimización de los beneficios. Además el análisis de sensibilidad muestra que la estancia de los containers y el tamaño del *layout* son los parámetros a ajustar para la obtención de un rendimiento óptimo.

En el capítulo III se hace una introducción a los diferentes procesos que componen la operativa de una terminal marítima de contenedores, posteriormente en el capítulo IV se hace un análisis de las remociones tanto indirectas como directas para concluir con un estudio del rendimiento.

En el capítulo V analizamos lo que es el objeto de este trabajo, el cálculo de los umbrales de producción y punto de equilibrio en función del rendimiento de explanada.

Llegados a este punto observamos que:

¹ Medidas comerciales de política tarifaria disuasiva.

- El punto de cierre es el Umbral de Producción, por debajo del mismo la empresa no cubre los costes variables de producción y debe cerrar.
- Entre el Umbral de Producción y el Umbral del Beneficio, la empresa cubre los costes variables de producción y parte de los fijos.
- A partir del Umbral del Beneficio cubre los costes totales y empieza a obtener beneficios en función del precio de mercado.
- El óptimo de producción se encuentra en el Punto de Equilibrio, en este punto el coste marginal se iguala al precio de mercado y el beneficio es máximo.

En las conclusiones parciales del capítulo dedicado a los umbrales y punto de equilibrio hemos observado que mientras el Punto de Equilibrio se encuentre por encima del Umbral del Beneficio el rendimiento del capital es máximo, con la siguiente particularidad:

- Dado un precio de mercado suficientemente grande y un nivel de calidad aceptable el beneficio es máximo aún cuando el Punto de Equilibrio se encuentre por encima de la producción crítica.

En el modelo hemos supuesto, intencionadamente, una estiba totalmente aleatoria de los containers, lo que supone el peor de los casos posibles. En la tabla siguiente vemos que en función del grado de homogenización disminuimos el número de remociones, consecuentemente aumentamos el rendimiento de explanada y disminuimos los costes variables de producción.

Grado de Homogeneidad	Coste Variable				
	0%	25%	50%	75%	100%
TEUS					
113684	3494168	2271406	1863819	1660025	1537749
109184	2832784	2067561	1754361	1583986	1476880
104684	2397211	1892430	1650827	1509141	1416010
100184	2083070	1739013	1552474	1435429	1355141
95684	1841726	1602416	1458679	1362793	1294272
91184	1647456	1479110	1368916	1291180	1233403
86684	1508744	1378313	1288408	1222680	1172534
82184	1399839	1291212	1214035	1156377	1111664
77684	1296264	1206337	1140564	1090365	1050795
73184	1197695	1123687	1068038	1024672	989926
68684	1103764	1043214	996479	959316	929057
64184	1014068	964833	925887	894308	868187
59684	928191	888428	856240	829652	807318
55184	845721	813857	787502	765342	746449
50684	766263	740969	719623	701369	685580
46184	689448	669607	652545	637717	624710
41684	614947	599621	586207	574368	563841
37184	542471	530874	520551	511304	502972
32684	471781	463246	455525	448508	442103
28184	402681	396638	391086	385967	381234
23684	335023	330977	327202	323672	320364
19184	268702	266213	263855	261619	259495
14684	203652	202322	201043	199812	198626
10184	139840	139301	138774	138260	137757

Tabla 53 Costes Variables según grado de homogeneidad

En la tabla siguiente observamos que a medida que aumentamos el grado de homogeneidad suben los umbrales hasta la saturación, pero con dos excepciones:

- El umbral de producción sube hasta llegar al 75% donde no existe² y en el 100% de homogeneidad el coste marginal siempre es igual al coste variable y

² Coste marginal y coste medio variable divergen desde el cero.

en consecuencia el umbral de producción no está definido. En otras palabras el coste medio variable es constante.

- El punto crítico es constante e independiente del grado de homogeneidad, como era de esperar, por ser función del tamaño y *layout* de la explanada.

Por otro lado el umbral de beneficio y el punto de equilibrio pueden llegar hasta la saturación, es decir divergen. Llegado ese nivel de producción es el cliente quien pone límite por no ser aceptables ni los rendimientos ni la calidad de los servicios que le ofrece la Terminal. El otro límite lo pone el mismo sistema al dejar de producir al ritmo deseado.

Homogeneidad	0%	25%	50%	75%	100%
UP	52496	94837	98192	0,0	Indefinido
UB	89143	98192	saturación	Saturación	Saturación
PE	107753	Saturación	saturación	Saturación	Saturación
PC	89143	89143	89143	89143	89143

Tabla 54 Ocupación de los diferentes Umbrales según el grado de homogeneidad

Aumentar el grado de homogenización de la estiba significa “mejorar la Planificación” dentro de las posibilidades reales de la Terminal, es decir de su tamaño, configuración, tipo y cantidad de maquinaria. Los puntos a tener en cuenta para mejorar la planificación de explanada serán:

Agrupar los containers según tipo de tráfico: Importación, exportación, trasbordos y vacíos con la siguiente segregación y jerarquía:

- Exportación:
 - Buque y número viaje³.
 - Longitud del container.
 - Tipo o ISO del container.
 - General o especiales⁴.
 - Puerto de descarga.
 - Peso, en orden inverso a la secuencia de carga.
- Trasbordos, 2 estrategias:
 - Volcado de la descarga por proximidad al buque aplicando una segregación parcial. Posteriormente se clasifican los containers mediante el procedimiento de *housekeeping*.

³ Cada viaje tiene un número y puede haber más de un viaje en estiba.

⁴ Mercancía peligrosa, frigorífica, fuera de medidas y estibas especiales (bajo cubierta, etc.)

- Descarga selectiva según buque de destino siguiendo la misma segregación y jerarquía que con la exportación.
- Vacíos, se utiliza un *depot* o área de almacenamiento primaria, por compañías, desde donde se preparan o hacia donde se retiran las cargas o descargas respectivamente, teniendo en cuenta las siguientes segregaciones:
 - Carga:
 - Buque y número viaje
 - Línea o compañía
 - Longitud del container.
 - Tipo o ISO del container.
 - Descarga:
 - Línea o compañía.
 - Longitud del container.
 - Tipo o ISO del container.
- Importación:
 - Descarga sobre una área genérica de importación según:
 - Longitud del container.
 - Tipo o ISO del container.
 - Descarga siguiendo una segregación cronológica según:
 - Longitud del container.
 - Tipo o ISO del container.

Nuevamente concluimos que el grado de homogenización de la explanada y la estancia de los containers son los factores determinantes para aumentar los umbrales y punto de equilibrio y en consecuencia para optimizar los beneficios de una Terminal Marítima de Containers.

En cuanto a los objetivos de una Terminal diferenciaremos dos enfoques, desde el punto de vista del cliente y desde el punto de vista del operador o Terminal.

Los clientes⁵ valorarán positivamente, desde el punto de vista operativo, los siguientes datos:

- Una ocupación de explanada entre el 50% y el 75%.
- Una ocupación de muelle entre el 30% y el 40%.
- Una ocupación de equipo (maquinaria y grúas) entre el 50% y el 75%.
- Un rendimiento de buque por hora alto, entorno a los 25 movimientos hora por cada 100 metros de eslora.
- Acceso, tiempo de maniobra al muelle y espera de grúas < 10% del tiempo operativo.

⁵ Elaboración propia según datos de las diferentes navieras.

- Disponibilidad de Manos de Estiba.
- Un tiempo de servicio entre 20' y 30' para la transferencia.
- Redes de comunicaciones terrestres, ferroviarias y fluviales.
- Redes de datos y comunicaciones, es decir infoestructura.
- Precios de los diferentes movimientos y estancias.

Existen otros términos que los armadores tienen en cuenta en sus contratos como por ejemplo su área de influencia geográfica o *hinterland*, índices de calidad como seguridad de la mercancía y conflictividad laboral, índices de averías, etc.

En definitiva el cliente valora la disponibilidad de medios (atraque, personal, explanada, grúas y maquinaria), el tiempo en puerto⁶ y el coste total por contenedor o tonelada producida en puerto.

Para la Terminal el objetivo es la maximización del beneficio, es decir maximizar la producción al mínimo coste, mediante la utilización intensiva de sus medios de producción de manera que estos sean lo más productivos posible. Entonces buscará:

- Maximizar el rendimiento de grúas de buque.
- Maximizar rendimiento de las máquinas de explanada.
- Conseguir unas rotaciones de muelle y explanada equilibradas con su tráfico y su capacidad estructural.

Como hemos visto a lo largo de esta tesis para conseguir el máximo beneficio es fundamental minimizar el número de remociones y de esta manera maximizar el rendimiento de explanada.

Una buena organización y ordenamiento de la explanada es indispensable, con ello conseguimos homogenizar estibas y unos rendimientos de explanada lo más próximos a uno es decir con “cero” remociones.

Hemos supuesto una distribución de los containers totalmente aleatoria, el peor de los casos posible, esto nos permite aplicar un grado de homogeneidad a la explanada y calcular fácilmente el nuevo rendimiento y sus costes asociados según la tabla anterior.

Por último decir que difícilmente conseguiremos “cero” remociones pero considerando grados de homogeneidad distintos por cada tipo de tráfico es decir importación, exportación, trasbordos y equipo vacío, además de una buena planificación teniendo en cuenta las limitaciones de espacio, conseguiremos un alto grado de homogeneidad y rendimientos medios próximos al 75%.

⁶ Los costes de escala representan los 2/3 del coste total. B. Franco [et al], *Managing Terminal Capacity and Productivity. Seminar Documentation. Lloyd's Maritime Academy, 2004.*

8 BIBLIOGRAFÍA

- Achútegui, J.J., La navegación en la época de los Descubrimientos. Monte Buciero, ISBN 1138-9680, N° 6, 2001, pags 9-24.
- Ahijado, M. Distribución, Precios de Producción y Crecimiento. 1ª ed. Barcelona: CEURA, 1982. ISBN 84-329-4604-4.
- Ahijado, M. Lecciones de Microeconomía. 1ª ed. Madrid: Manuel Ahijado Quintillán, 1985. ISBN 84-398-4605-3.
- Ahijado, M. Notas de Microeconomía y Distribución. 1ª ed. Madrid: CEURA, 1986. ISBN 84-85942-42-6.
- Ahijado, M. Problemas resueltos de Microeconomía y Macroeconomía. 1ª ed. Madrid: Ceura, 1987. ISBN 84-85942-51-5.
- Arbonés Malisani, E.A. Logística Empresarial. Barcelona: MARCOMBO, 1990. ISBN 84-267-0798-X.
- ASME (The American Society of Mechanical Engineers). The PACECO Container Crane. The World's First High Speed, Dockside, Container Handling Crane. A: ASME. [en línea]. [Consulta: 6 de enero 2005]. Disponible en < <http://www.asme.org/history/brochures/h085.pdf> >
- Barbudo Duarte, E. [et al.]. Tratado de Maniobra. 6ª ed. Cádiz: Colección Fragata, 1980. ISBN: 84-300-5509-6.
- Baudez, L. La mesure de la Productivité. Transports, 1985, n°301, 1985.
- Bendell, H. [et al.]. On Measuring Cargo Handling productivity. Marine Policy and Management, 1987, Vol. 14, N°4, pp. 337-343.
- Benjamin, J.R. y Cornell, C. A. Probabilidad y Estadística en Ingeniería Civil. Bogotá: McGraw-Hill, 1981.
- BIC. Bureau International des Containers et des Transports Internationaux. [en línea]. [consulta: 12 de febrero de 2005]. Disponible en: < <http://www.bic-code.org/html-fr/presentation.html> >
- BOXSHIP. BOXSHIP 2001. The Evolution of the Container Ship. Trinity House, Tower Hill, London EC3. May 2001.
- Bronson, R. Investigación de Operaciones. 1ª ed. México D.F.: McGraw-Hill, 1993. ISBN 97-010-0257-1.
- Bruzzone, A., Signorile, R. Simulation and genetic algorithms for ship planning and shipyard layout. Simulation, 1998, 71 (2), 74-83.
- Canavos, G.C. Probabilidad y Estadística: Aplicaciones y Métodos. 1ª ed. Madrid: McGraw_Hill, 1988. ISBN 84-481-0038-7.
- Cargo Security Overview: Technologies-Government and Customs initiatives. Eyefortransport First Conferences Ltd.: November 2002. Disponible en: < <http://www.eyefortransport.com/> >

- Castilho, B., Daganzo, C.F. Handling strategies for import containers at marine terminals. *Transportation Research*, 1993, 27 (2), 151–166.
- Cazorla, M.A. [et al.]. *Fundamentos de Inteligencia Artificial*. 1ª ed. Alicante: Universidad de Alicante Publicaciones, 1999. ISBN 84-7908-446-4.
- Chadwin, M.L. [et al.]. *Ocean Containers Transportation: An Operational Perspective*. New York: Taylor & Francis, 1990. ISBN 0-8448-1628-0.
- Cho, D. W., Development of a methodology for containership load planning, Ph.D. Thesis, Oregon State University, 1982.
- Chung, Y. G., An animated simulation model for a transtainer based container handling./facility, Master Thesis, Oregon State University, 1987.
- Chung, Y. G., Randhawa, S. U. and McDowell, E. D., A simulation analysis for transtainer-based container handling facility. *Computers Ind. Eng.*, 1988, 14, 113-125.
- Conference Documentation. Port Policy & Container Terminal Operations. TOC-2006, (THE TERMINAL OPERATIONS CONFERENCE & EXHIBITION). Hamburg: IIR Exhibitions ltd. Disponible en: < <http://isg.toc-events.com/NASApp/cs/ContentServer?pagename=mtevents/home&mtevent=eurotoc05> >
- Conference Documentation. Port Policy & Container Terminal Operations. TOC-2007, (THE TERMINAL OPERATIONS CONFERENCE & EXHIBITION). Istanbul: IIR Exhibitions ltd. Disponible en: < <http://isg.toc-events.com/NASApp/cs/ContentServer?pagename=mtevents/home&mtevent=eurotoc05> >
- Consejo Superior de Transportes Terrestres. *Transportes Combinados*. Madrid: MOP, 1967. Depósito legal M. 17580.
- COSMOS Technical Documentation for Terminal de Contêineres de Paranagua S.A. COSMOS NV. 10 de octubre de 2001. TechDoc_TCP.doc
- Daganzo, C. The Crane Scheduling Problem. *Transportation Research*, 1989, vol. 23B, nº3, p.159-175.
- De Brossard, M. *Historia Marítima del Mundo*. 1ª ed. Barcelona: Ediciones Amaika, S.A., 1976. ISBN: 84-851163-27-3.
- ECMT. European Conference of Ministers of Transport. [en línea]. [consulta: 17 de abril de 2005]. Disponible en: < <http://www1.oecd.org/cem/about.htm> >
- Egozcue, J.J. *Transformadas de Fourier*. Apuntes programa de Ciencias del Mar, Análisis frecuencial de señales. Barcelona: 1995.
- Eurostat/Dirección General para la Energía y el Transporte. < http://epp.eurostat.cec.eu.int/portal/page?_pageid=1090,30070682,1090_30298591&_dad=portal&_schema=PORTAL >
- Fernández Pirla, J.M. *Economía y Gestión de la Empresa*. 9ª ed. Madrid: Ediciones ICE, 1981. Biblioteca de Ciencias Empresariales, Colección Cibernos. ISBN84-7085-027-X
- Gardeta, G.J. *Elementos de Ingeniería del Tráfico*. 3ª ed. Madrid: Colegio de Ing. de Caminos Canales y Puertos, 1995.

- Goldsmith-Carter, G. Veleros de todo el mundo. 1ª ed. Barcelona: Editorial Bruguera, 1970.
- Goodchild A. V., Daganzo C.F. Crane double cycling in container ports: Planning methods and evaluation. *Transportation Research*, October 2007, Part B, Volume 41, Issue 8, Pages 875-891
- Gue, R.L. y Thomas, M.E. *Mathematical Methods in Operations Research*. New York: The Macmillan Co., 1968.
- Guttenberg, E. *Economía de la Empresa: Teoría y práctica de la gestión empresarial*. 4ª ed. Bilbao: Ediciones Deusto, 1978. Colección GESTIÓN. ISBN 84-234-0131-6.
- Hall, R. W. *Queuing Methods: For Services and Manufacturing*. 1ª ed. Englewood Cliffs, New Jersey 07632: Prentice Hall, Inc., 1991. ISBN 0-13-744759-6.
- Hatzithedorou, G. C., Cost comparison of container handling techniques. *J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 1983, 109, 54--62.
- Heizer, J.; Render, B.; *Dirección de la Producción*. 4ª ed. Madrid: Prentice Hall Iberia, 1997. *Decisiones Tácticas*. ISBN 84-89660-13-1.
- Hillier, FS.; Lieberman, G.J.; *Investigación de Operaciones*. 7ª ed. MÉXICO D.F.: McGraw-Hill Companies, 2002. ISBN 007-232169-5.
- Holguin-Veras, J. Priority systems for marine inter-modal containers. Ph.D. Thesis, The University of Texas, Austin. 1996.
- Hsu, Hwei. P. *Análisis de Fourier*. Wilmington, Delaware: Addison-Wesley iberoamericana, S.A., 1987. ISBN 0-201-02942-1.
- <http://navis.com/home.jsp>
- <http://www.cosmos.be/>
- <http://www.unece.org/trade/untid/welcome.htm>
- ICC. International Chamber of Commerce. The World Business Organization. [en línea]. [consulta: 17 de abril de 2005]. Disponible en: < http://www.iccwbo.org/home/menu_what_is_icc.asp >
- Imai, A., Nishimura, E., Papadimitriou, S. The dynamic berth allocation problem for a container port. *Transportation Research*, 2001, Part B 35 (4), 401–417.
- Imai, A., Sun, X., Nishimura, E., and Papadimitriou, S. Berth allocation in a container port: using a continuous location space approach. *Transportation Research*, 2005, Part B Volume 39, Issue 3, Pages 197-295.
- International Conference, BOXSHIP 2001. Future evolution of the containership. Trinity House, Tower Hill, London EC3: Lloyd's List events, May 2001. [www.lloydslistevents.com].
- ISO Standards Handbook: Freight Containers. 3ª ed. Geneva: ISO, 2000. ISBN 92
- ISO. International Organization for Standardization. [en línea]. [consulta: 20 de enero de 2004]. Disponible en: < <http://www.iso.org/iso/en/ISOOnline.frontpage> >
- José Holguín-Veras and Sergio Jara-Díaz. Optimal pricing for priority service and space allocation in container ports. *Transportation Research Part B: Methodological*, Volume 33, Issue 2, April 1998, Pages 81-106.

- Kai Lai Chung. Teoría Elemental de la probabilidad y de los Procesos Estocásticos. Versión española, Luís Bou García. Barcelona: Editorial Reverte, 1983. ISBN 84-291-5049-8.
- Kap Hwan Kim & Ki Young Kim, Optimal price schedules for storage of inbound containers. *Transportation Research*, October 2007, Part B, Volume 41, Issue 8, Pages 892-905.
- Kiesling, M. Analysis of Loading/Unloading Operations and Vehicle Queuing Process at Container Port Wharf Cranes. Ph.D. Thesis, University of Texas at Austin, 1991.
- Kim, K.H. Evaluation of the number of rehandles in container yards. *Computers and Industrial Engineering*, 1997, 32 (4), 701–711.
- Kim, K.H., Bae Kim,H. The optimal sizing of the storage space and handling facilities for import containers. *Transportation Research Part B: Methodological*, Volume 36, Issue 9, November 2002, Pages 821-835.
- Kim, K.H., Bae, J.W. Re-marshaling export containers in port container terminals. *Computers and Industrial Engineering*, 1998, 35 (3–4), 655–658.
- Kim, K.H., Kim, H.B. The optimal determination of the space requirement and the number of transfer cranes for import containers. *Computers and Industrial Engineering*, 1998, 35 (3–4), 427–430.
- Kim, K.H., Park, Y.M., Ryu, K.-R. Deriving decision rules to locate export containers in container yards. *European Journal of Operational Research*, 2000, 124, 89–101.
- Koriakin, S.F. Economía del Transporte Marítimo. Moscú: MIR, 1978.
- León, A.; Romero R. Logística del Transporte Marítimo. 1ª ed. Barcelona: LogisBook, 2003. Colección “GESTIONA”. ISBN 84-86684-20-X.
- Libro Blanco de la UE. Disponible en:<
http://europa.eu.int/comm/energy_transport/es/lb_es.html >
- Lipsey, G. R. Introducción a la Economía Positiva. 10ª ed. Barcelona: Vicens-Vives, S.A., 1982. ISBN 84-316-150-X.
- Liu, C.I., Jula, H., Ioannou, P.A. Design, simulation, evaluation of automated container terminals. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2002, 3 (1), 12–26.
- Lloyd’s Register. Leading the way in developing the optimum ultra large container ship. [en línea]. [consulta: 17 de julio de 2004]. Disponible en: <
http://www.lr.org/market_sector/marine/ulcs.htm >
- Lodder, O. Containerisation. 2003. Conferencia dada en la *Terminal de Contenidors de Barcelona S.L.* sobre los puntos clave para la contratación de una terminal portuaria por el armador, Barcelona 5 de mayo de 2003 [documento inédito de la presentación, Otto Lodder, Contract Manager P&O NEDLLOYD]
- López, P. El positivismo. El círculo de Viena. Karl Popper. Liceus. El Portal de las Humanidades. [en línea]. [Consulta: 31 de marzo 2005]. Disponible en:<
<http://www.liceus.com/cgi-bin/aco/fil/02/2401.asp>>.
- Marí Sagarra, R.; De Souza, A.J. ; Martín, J.;Rodrigo de Larrucea, J. (2003). El transporte de contenedores Terminales, operatividad y casuística. UPC Edicions. 282 p. ISBN: 84-8301690-7.
- Marí Sagarra, R.; Rodrigo de Larrucea, J. (2007). El transporte en contenedor. 1 ed. Barcelona:

- MARGE BOOKS. 264 p. ISBN: 978-84-866684-76-1.
- Marshall, S.G. Containerization First "Tipping Point": The Fall of the New York Port. 1965-1975. 6 de Octubre 2001. [en línea] [consulta: 18 de abril 2005]. Disponible en: <
<http://www.gothamcenter.org/festival/2001/confpapers/marshall.pdf>>
- Martin, G. L., Jr., A containership load planning heuristic for a transtainer based container port, M. Sc. Thesis, Oregon State University, 1982
- Mathews, J.; Fink, K.D. Métodos Numéricos con MATLAB. 3ª ed. Madrid: Prentice Hall, 2000. ISBN 0-13-270042-5.
- McDowell, E., Martin, G., Cho, D. and West, T., A study of maritime container handling, Oregon State University, Sea Grant College Program, Ads, Corvallis, Oregon 97331, 402, 1985, 1 10.
- Meade, M.L.; Dillon, C.R. Señales y Sistemas. 2ª ed. Wilmington, Delaware: Addison-Wesley Iberoamericana, S.A., 1993. ISBN 0-200-60138-9.
- Monfort A. [et al.]. Terminales marítimas de contenedores: El desarrollo de la automatización. 1ª ed. Valencia: IPEC (Fundación Instituto Portuario de Estudios y Cooperación de la Comunidad valenciana), 2001. ISBN 84-923957-3-7.
- Montgomery, D.C.; Runger, G.C. Probabilidad y Estadística aplicadas a la Ingeniería. 1ª ed. México: McGraw-Hill Interamericana Editores, S.A., 1996. ISBN 0-471-54041-2.
- Murty, K.G., Liu, J., Wan, Y.-w., Zhang, C., Tsang, M., Linn, R. DSS (decision support systems) for operations in a container shipping terminal. In: Proceedings of the First Gulf Conference on Decision Support Systems, Kuwait, 6–8 November, 2000. pp. 189–208.
- Neter, J. and Wasserman, W., Applied Linear Statistical Models. Richard D. Irwin, Inc., Illinois, 1974, pp. 82 92.
- Payer H.G. Economic and Technical Aspects of Mega-Container Carriers. International Association of Maritime Economists (IAME). Annual Conference and General Meeting in Panama -13 to 15 November 2002. Germanischer Lloyd, Hamburg. Disponible en:
http://www.eclac.cl/transporte/perfil/iame_papers/proceedings/Payer.doc
- Pérez Fiaño, J. E. Optimización del Proceso de Asignación del Trabajo Portuario. Tesis Doctoral, UPC, Ingeniería Civil, 1997. [Biblioteca Rector Gabriel Ferraté de la Universitat].
- Pérez Gutiérrez, M. Como Mejorar los Métodos de Trabajo. 2ª ed. Bilbao: Ediciones Deusto, 1983. ISBN 84-234-0546-X.
- Pérez Tamayo, R. ¿Existe el Método Científico? : Historia y realidad. 1ª ed. México D.F.: El Colegio Nacional y Fondo de Cultura Económica, 1998. ISBN 968-16-5658-X.
- Peterkofsky, R.I., Daganzo, C. A branch and bound solution method for the crane scheduling problem. Transportation Research Part B: Methodological, Volume 24, Issue 3, June 1990, Pages 159-172.
- Piniella Corbacho, Fco. J., Transporte marítimo y medio ambiente: Un binomio reconciliable. Universidad de Cádiz. Servicio de Publicaciones, 1996. ISBN 84-7786288-5.
- Reiriz Basoco, J. Compendio de estiba. 1975. EON La Coruña. Apuntes de la cátedra de Maniobra y Estiba.

- Ríos Insúa, D. [et al.]. Simulación: Métodos y aplicaciones. 1ª ed. Madrid: RA-MA, 1997. Grupo de Análisis y Decisiones, Departamento de Inteligencia Artificial, Facultad de Informática, Universidad Politécnica de Madrid. ISBN 84-7897-258-7.
- Roux, E.D., 1996. Storage capacity for import containers at seaports. Ph.D. Thesis, University of California, Berkeley. Transportation Research B 27 (1), 13–32.
- Saanen, Y. [et al.]. Managing Terminal Capacity and Productivity. Seminar Documentation. Lloyd's Maritime Academy, 29-30 september 2004. Londres: informa maritime & transport. Registered number : 1072954. Disponible en: < www.lloydsmaritimeacademy.com/ >.
- Saanen, Y. [et al.]. The 3rd International. Managing Terminal Capacity and Productivity. Seminar Documentation. Lloyd's Maritime Academy, 29-30 september 2005. Londres: informa maritime & transport. Registered number : 1072954. Disponible en: < www.lloydsmaritimeacademy.com/ >.
- Sauerbier, C. Marine Cargo Operations. New York: John Wiley & Sons, 1956. Library of Congress Catalog card Number: 56-7164.
- Simón Segura, F. Historia Económica Mundial y de España. 2ª ed. Madrid: Universidad Nacional de Educación a Distancia, 1987. ISBN:84-362-1880-9.
- Spinetti, C. Tecniche di funzionamento e gestione dei piazzali portuali [en línea]. Ferrari, P.; Prateli, A. Tesi di laurea, Università di Pisa, Ingegneria Civile, 2003. [consulta: 10/08/2004] [<http://etd.adm.inipi.it/theses/available/etd-05212003-110116/>]
- Taleb Ibrahim, M. Modelling and analysis of container storage in ports. Ph.D. Thesis, University of California at Berkeley, Dept. Of Industrial Engineering and Operation research, 1989.
- Taleb-Ibrahim, M., de Castilho, B., Daganzo, C. Storage space vs. handling work in container terminals, Transportation Research Part B: Methodological, Volume 27, Issue 1, February 1993, Pages 13-32.
- Tarragó Sabaté, F. Iniciación a la Economía de la Empresa. 5ª ed. Barcelona: Editorial Hispano Europea, S.A. 1981. ISBN 84-255-0486-4.
- The ICHCA, (INTERNATIONAL CARGO HANDLING COORDINATION ASSOCIATION).[en línea]. Londres: ICHCA International Limited (IIL), 8th July 2004-[25 diciembre 2004]. [<http://www.ichcainternational.co.uk>]
- Thomas R.E. The Properties and Stowage of Cargoes. 6th ed. Revised. Glasgow: Brown, Son & Ferguson, 1971.
- Thonemann, U.W., Brandeau, M.L., 1998. Optimal storage assignment policies for automated storage and retrieval systems with stochastic demands. Management Science 44 (1), 142–148.
- Tongzon, J. Modelos de Productividad Portuaria. Transportation Research, 1995, Part A 2001.
- Tozer, David & Penfold, Andrew. Ultra Large Container Ships . Designing to the limit of current and projected terminal infrastructure capabilities. [Consulta: 31 de marzo de 2007]. Disponible en :< <http://www.antiport.de/doku/gutachten/ulcs.pdf>>
- UIC. International Union of Railways. Combined Transport. [en línea][consulta: 20 de marzo 2005]. Disponible < <http://www.uic.asso.fr/tc/> >

- UNECE. United Nations Economic Commission for Europe. Transport Division. [en línea]. [Consulta: 15 de abril 2005]. Disponible en: <
<http://www.unece.org/trans/presentTransDiv.html> >
- Veterenko, L.D.; Kovalev, P.D. Normalización Técnica del Trabajo en los Puertos Marítimos. Moscú: MIR, 1977.
- Watanabe, I. Container Terminal Planning: A Theoretical Approach. 1ª ed. Ashsted, Surrey KT21 2DJ: WCN Publishing, 2001. ISBN 0-9540210-0-2.
- Watanabe, I., Characteristics and analysis method of efficiencies of container terminal-an approach to the optimal loading/unloading method, Container Age, 1991, March, 36-47.
- Zhang, C. [et al.]. Dynamic crane deployment in container storage yards. Transportation Research, July 2002, Part B vol.36, p. 537-555.
- Zhang, C. [et al.]. Storage space allocation in container terminals. Transportation Research, 2003, Part B vol.37, p. 883-903.
- Zhang, C., 2000. Resource planning in container storage yards. Ph.D. Thesis, The Hong Kong University of Science and Technology.
- Zhang, C., Wan, Y.-w., Liu, J., Linn, R., 2002. Dynamic crane deployment in container storage yards. Transportation Research B 36 (6), 537–555.

9 INDICE DE ACRONIMOS Y NOMENCLATURA ESPECIFICA

AGV	<i>Automated Gided Vehicle.</i>
ASC	<i>Autimated Stacking Crane.</i>
Bahía (Bay)	Subdivisión de la bodega de un buque.
Baplie	<i>UN/Edifact bayplan message.</i>
BBC	<i>Break Bulk Cargo</i> , mercancía suelta sin containerizar, debido a su gran volumen y/o peso.
BIC	<i>Bureau Internacional des Conteneurs.</i>
Buffer	Zona de espera para operación asignada a los camiones. En un sentido más amplio también se puede aplicar a otros medios de transporte.
CCR	<i>Computer Carácter Recognition.</i>
CFS	<i>Container Freight Station.</i>
Demora	Tiempo en que alguno de los medios de producción tiene rendimiento cero, es decir produce cero unidades.
DGPS	<i>Differencial Global Positioning System</i>
DUA	Documento Unico Administrativo.
EDI	<i>Electronic Data Interchange.</i>
EDIFACT	<i>Electronic Data Interchange for administration Commerce and Transport.</i>
ETA	<i>Expecting Time of Arrival.</i>
ETD	<i>Expecting Time of Departure.</i>
Explanada	Area de almacenamiento de los containers.
FCL	<i>Full Container Load.</i>
Feeder	Buques de tamaño medio o pequeño que conectan con los destinos marítimos finales.
FEU	<i>Forty-foot (container) Equivalent Unit.</i>
IMDG	<i>International Maritime Dangerous Goods, Code.</i>
IMO	<i>International Maritime Organization.</i>
Incoterm	Los Incoterms son unas reglas internacionales para la interpretación de los términos comerciales fijados por la Cámara de Comercio Internacional. La palabra INCOTERM viene de la contracción del inglés de: INternational COMercial TERMS.
Intensiva	Periodos de tiempo en que se divide la operativa de un buque. Normalmente de seis horas por periodo y cuatro intensivas por día.
LCL	Un contenedor LCL está compuesto por diferentes partidas de mercancías “ <i>Less Than One Container Load</i> ”.
Mano	Equipo de estibadores con diferentes especialidades que operan con una grúa.
MTS	<i>Multitrailer System.</i>
OCR	<i>Optical Character Recognition.</i>
OHBC	<i>Over Head Bridge Crane.</i>
ORS	<i>Optical Recognition System.</i>
PIF	Punto de Inspección Fronterizo. Sanidad.

INDICE DE ACRONIMOS Y NOMENCLATURA ESPECIFICA

PLC	<i>Porgrammable Logical Controller.</i>
Poza	Area de interfase entre las grúas <i>portainer</i> y la maquinaria de apoyo.
RDT	<i>Radio Data Transmisión.</i>
Remoción	Movimientos adicionales para mover un container.
RF	Radio Frecuencia.
RMG	<i>Rail Mounted Gantry Crane.</i>
RTG	<i>Rubber Tyred Gantry Crane.</i>
SC	<i>Straddle Carrier.</i>
Schedule	Tabla de ETD's y ETA's del buque para una rotación completa (viaje redondo).
SMDG	<i>Shiplaning Messages Development Group.</i>
Spreader	Aparejo con cuatro puntos de anclaje automáticos, se utiliza para manipular containers.
Tandem	Spreader que permite manipular 4 TEUS simultáneamente.
TEU	Unidad equivalente a un contenedor de veinte pies.
TOS	<i>Terminal Operating System.</i>
Twin	Spreader que permite manipular 2 containers de 20' simultáneamente.
UIC	<i>Union Internacional des Chemins de fer.</i>
ULCS	Ultra Large Container Vessel.
UN EDIFACT	<i>United Nations Directories for Electronic Data Interchange for Administration, Commerce and Transport.</i>
UN/ECE	<i>United Nations Economic Commission for Europe.</i>
UNCTAD	<i>United Nations Conference on Trade and Development.</i>
VLCS	Large Container Vessel.
Windows	Las Ventanas o <i>Windows</i> son unas reservas de atraque y número mínimo de grúas.
XML	<i>eXtended Mark-up Language.</i>
SERVICIO	<i>Conjunto de armadores que comparten buques en una línea regular.</i>

10 ANEXO A

Tendencia de los estudios y proyectos. Generalidades

La tendencia actual en las investigaciones se centra en los ULCS¹ y la infraestructura necesaria para trabajar con este tipo de buques por ejemplo grúas Súper-Post-Panamax con doble carro, atraques con doble muelle para poder trabajar con grúas a ambos costados del buque lo que doblaría el número de manos posibles y la productividad en puerto etc.

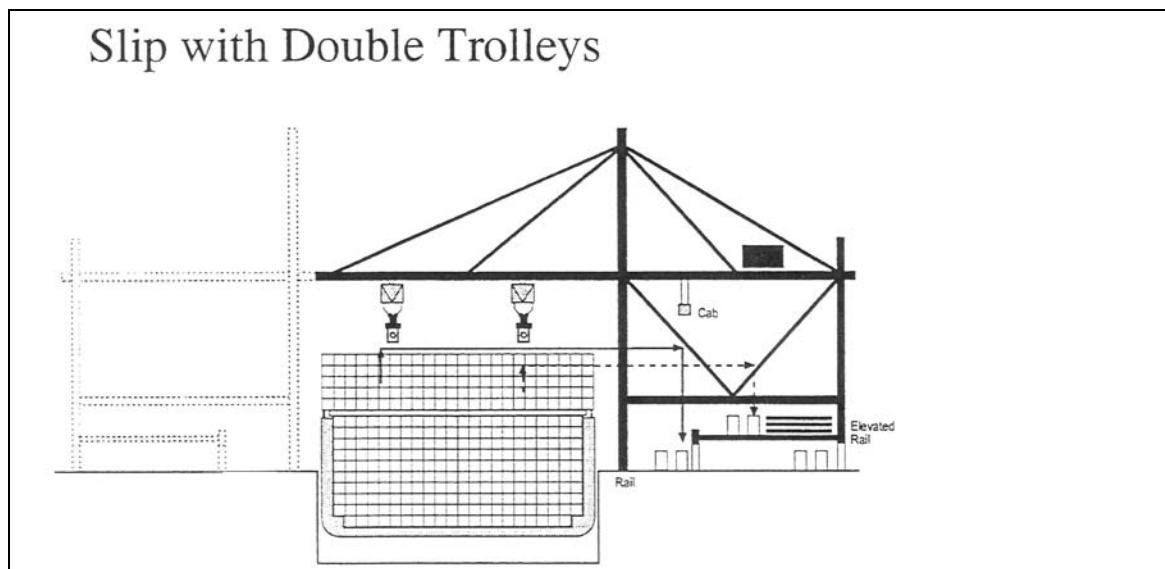


Figura 27 Ejemplo de buque trabajando con una grúa de doble carro² a cada costado de una grada de operaciones

Los buques Súper Post Panamax (ULCS) requieren grúas³ que alcancen entre 19 y 22 containers de manga y poder trabajar estibas de hasta 50 metros de altura desde el punto más bajo de la quilla, esto significa apilamientos de hasta 10 containers en bodega y 8 en cubierta.

¹ Tozer, David & Andrew Penfold. Ultra Large Container Ships . Designing to the limit of current and projected terminal infrastructure capabilities. [Consulta: 31 de marzo de 2007]. Disponible en :< <http://www.antiport.de/doku/gutachten/ulcs.pdf>>

² BOXSHIP. BOXSHIP 2001. *The Evolution of the Container Ship*. Trinity House, Tower Hill, London EC3. May 2001.

³ Payer H.G. Economic and Technical Aspects of Mega-Container Carriers. International Association of Maritime Economists (IAME). Annual Conference and General Meeting in Panama -13 to 15 November 2002. Germanischer Lloyd, Hamburg. Disponible en:

http://www.eclac.cl/transporte/perfil/iame_papers/proceedings/Payer.doc

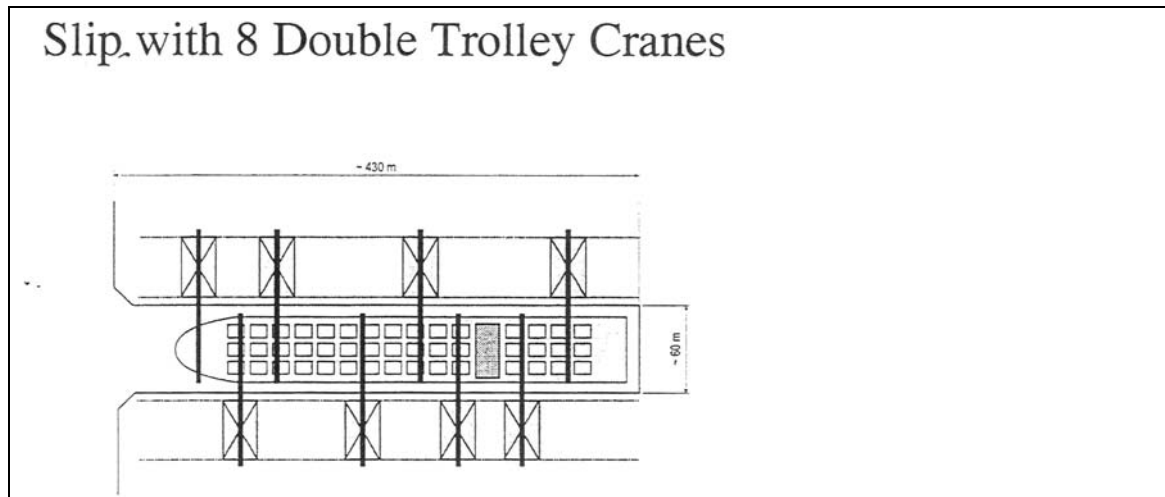


Figura 28 Buque atracado en doble grada⁴, trabajando con cuatro grúas de doble carro por costado

Otros estudios que se están realizando tratan de la conveniencia o no de introducir estos megabuques con su consiguiente disminución de los costes marginales por contenedor pero al mismo tiempo con un incremento en los costes por distribución.

Probablemente el aspecto más determinante en la actualidad es haber conseguido sistemas que trabajen en tiempo real la explanada y en general todos los procesos de la terminal y del transporte multimodal, en base a un sistema de radiofrecuencias y DGPS (situación por satélite) para tener en todo momento la situación de las máquinas complementado con unos *tags* o etiquetas electrónicas para identificar al contenedor, en tiempo real, tanto por situación como por identificación o matrícula. Los grupos empresariales COSMOS y NAVIS son punteros en este campo.

También en la automatización de los procesos de manipulación se han conseguido grandes progresos y son objeto de estudios y nuevos proyectos especialmente en las terminales de ECT en Róterdam, Thamesport en Londres y CTA en Hamburgo.

Maquinaria

La aparición de buques cada vez mayores implica mayores recorridos de la grúa, al mismo tiempo el aumento del tráfico de contenedores implica áreas de almacenaje cada vez mayores y una mejor utilización del espacio disponible.

Como consecuencia los ciclos de máquina, en ambos casos, son más grandes. Teniendo en cuenta esta circunstancia la maquinaria cada vez se diseña con mayores prestaciones de capacidad y carga de trabajo, pero aún así es difícil poder superar los 45/hora (teóricos) por grúa. Por esta razón se están desarrollando nuevos conceptos en cuanto a la maquinaria utilizada por las terminales de contenedores.

⁴ *BOXSHIP. BOXSHIP 2001. The Evolution of the Container Ship. Trinity House, Tower Hill, London EC3. May 2001.*

En el primer caso de mejora de prestaciones de la maquinaria existente mediante nuevos dispositivos y mejora de prestaciones lo más destacable es:

- Utilización de Twin-lift (2x20')
- Utilización de Tandem (2x40') e incluso Tandem (2x2x20')
- Operar con doble ciclo (carga-descarga en la misma izada)
- Utilización de técnicas OCR, RF, DGPS, sistemas Biométricos y TAGS para la identificación de contenedores, precintos, chóferes, y ubicación de los contenedores. Estas técnicas se usan durante la entrada, manipulación y almacenaje y por último a la salida del sistema.
- Por supuesto mayores prestaciones de la maquinaria.

En el segundo caso, es decir nuevos conceptos de maquinaria:

- *Grúas con doble carro* y una plataforma de altura ajustable, que actúa de buffer entre los dos carros.
- *Grúas Jumbo*, que tienen la particularidad de que durante su traslación transversal el contenedor es girado 90° y está sincronizado con un elevador fuera de patas que recibe o entrega los contenedores a la maquinaria de explanada.
- *Grúas Porteadoras* (Carrier Crane), son grúas con doble carro, uno para operar el buque y otro para operar con la maquinaria de explanada, además de un sistema ajustable que transporta los contenedores (sobre la pluma) desde un carro al otro.
- Todo lo anterior se puede combinar con *sistema paternóster* que trabaja con varios carros sincronizados (mecánica o electrónicamente) o trabajando independientemente unos de otros.
- AGV (Automated Guided Vehicles). Combinado normalmente con RTG o RMG.
- Actualmente se están sustituyendo los transtainers sobre ruedas RTG's y sobre raíles RMG's por los ASC's (*Automated Stacking Cranes*) que son unos transtainers automáticos sobre raíles de alta velocidad longitudinal.
- *Shuttles* vancarriers con manipulante que trabajan a 1 de altura. Combinado normalmente con RTG o RMG.
- PCT (*Automated Portal Container Transporters*), son similares a los Shuttles pero sin manipulante.
- *Straddlecarriers*, RTG's RMG's automáticos o semiautomáticos. Posibilidad de trabajar con dos RMG's de distinto tamaño en el mismo bloque, que permita el cruce físico de ambos.
- Multitrailers con enganche automático.

Procesos automáticos

Es difícil integrar los diferentes subsistemas en un proceso automático total, además la combinación de ambos requiere de interfaces o buffers que permitan la interacción de los procesos automáticos con los manuales.

En cualquier caso la automatización tanto del proceso como de la maquinaria que se utiliza en el traslado de contenedores desde poza a bloque y viceversa, es un hecho en algunas terminales, por ejemplo ECT en Róterdam y CTA en Hamburgo.

Lo mismo ocurre con la recepción y entrega de puerta en la fase de estiba y desestiba de bloque, donde se utilizan RMG's semiautomáticos o ASC's que cargan o descargan el contenedor de forma semiautomática y lo estiban o desestiban en bloque de forma automática.

En cuanto a la automatización del proceso de grúas, podemos decir que es independiente de los otros subprocesos y de hecho, las grúas con doble carro suelen tener automatizado el segundo proceso aunque sincronizado con el primero.

Por último la planificación necesita de un software modulado que controle los flujos de contenedores y del equipo de manipulación en las diferentes etapas de programación, ejecución y control de las operaciones.

Costes

En la tabla y gráfico siguientes observamos las ventajas, a partir de 500 horas de utilización, en cuanto a costes de los sistemas automáticos versus los manuales.

Esta diferencia es todavía más ostensible si consideramos la tendencia a la saturación de las grandes terminales marítimas, la razón es que a mayor saturación mayor grado de utilización de maquinaria en labores de *housekeeping*.

Ejemplo del proceso de operativa grúa con 30 movimientos por hora, alimentada por diferentes sistemas manuales y automáticos:

Costes en euros	AGV (automático)	PCT (automático)	SHUTTLE (manual)	TT (manual)
Nº vehículos	6	4	3	5
CF anual	200.820	200.160	125.100	58.206
CV por hora flete	79	70	243	354

Tabla 55 Comparación de costes en la operativa poza-bloque y viceversa

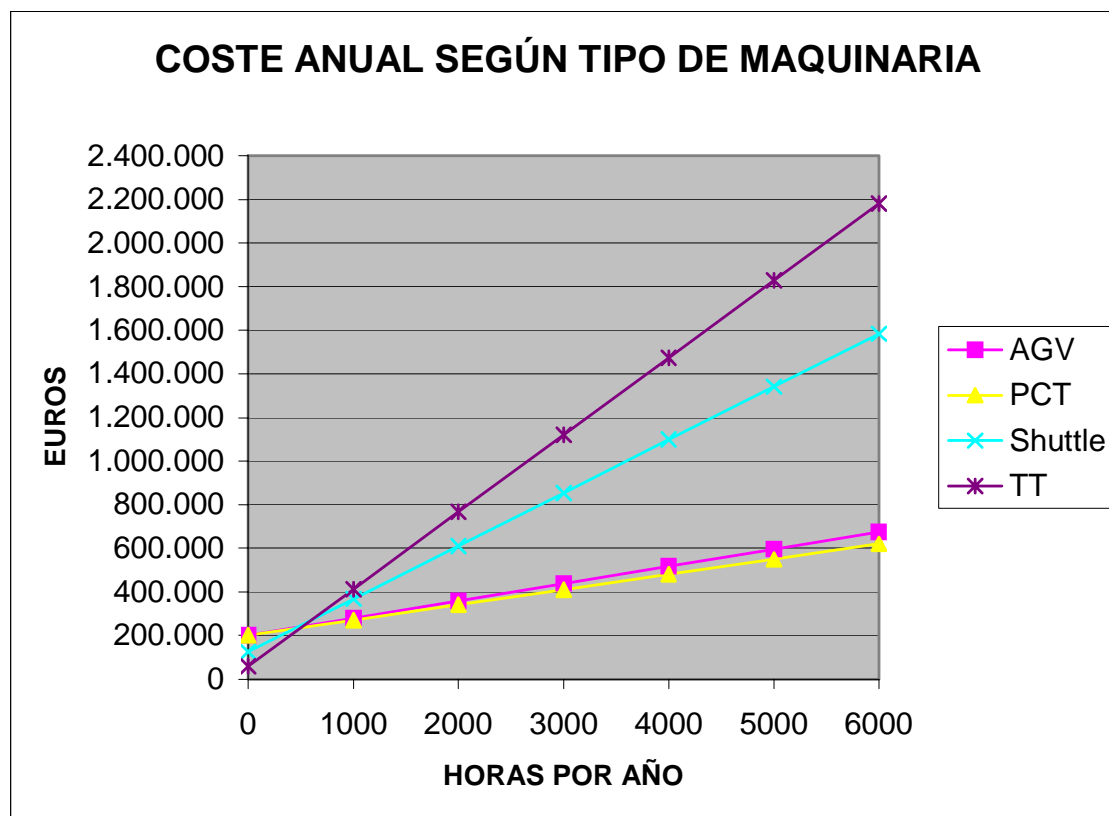


Gráfico 43 Coste⁵ por año según maquinaria de transferencia utilizada (según tabla anterior).

La conclusión es la necesidad de automatizar la producción en lo que es la explanada, es decir considerar la explanada como un área cerrada donde las máquinas trabajan de forma automática según la planificación de la producción, entregas, recepciones y preparaciones de estiba.

La automatización de la maquinaria que alimenta la explanada vía tren, camión o buque requiere tratamientos diferentes y los estudios y aplicaciones se encuentran en fases distintas. Por ejemplo la maquinaria de transferencia entre explanada y buque funciona de forma automática cuando se utilizan PCT's o AGV's, en cambio la transferencia entre explanada y camiones o tren todavía se hace de forma manual o semiautomática en algunos casos⁶.

El último paso en la automatización serán las grúas portainer que operan los buques, en la actualidad se están desarrollando estudios y pruebas piloto entre diferentes empresas dedicadas a la construcción de maquinaria⁷ y empresas de software⁸ dedicadas los sistemas operativos de terminales (TOS).

⁵ Visser, W. [et al.]. *Managing Terminal Capacity and Productivity. Seminar Documentation. Lloyd's Maritime Academy, 29-30 september 2004. Londres: informa maritime & transport. Registered number : 1072954. Disponible en: < www.lloydsmaritimeacademy.com/ >.*

⁶ Cuando el ASC pasa a manual y es manipulado a distancia por un operador para descargar o cargar un camión, después pasa a automático cuando el container es estibado o desdestibado del bloque de explanada.

⁷ Gottwald Port Technology GmbH

La concentración empresarial en el sector marítimo

La globalización de la economía no puede quedar al margen en el sector marítimo y así como estamos asistiendo a grandes procesos de adquisiciones, fusiones y alianzas entre empresas del mismo sector y en algunos casos incluso de sectores totalmente distintos como es el caso de la banca, telecomunicaciones y la energía actualmente, en el sector marítimo sucede lo mismo aunque todavía no se ha llegado a las concentraciones de otros sectores.

Por ejemplo en el campo de las Líneas Regulares existe un apreciable nivel de concentración pero las tasas son todavía débiles en el campo de la carga seca y en el transporte del crudo y sus derivados.

En esencia el transporte marítimo todavía está en posición de ser objeto de procesos de alianzas y fusiones y en consecuencia todavía vamos a asistir a nuevas dinámicas de concentración de operadores.

El caso concreto del Contenedor

La previsión de futuro augura un crecimiento notable de la flota mundial de portacontenedores y de la concentración de capital en el sector.

En dicho sector las diez primeras compañías navieras absorben el 59.9% del tráfico mundial de transporte de contenedores, según vemos en la tabla siguiente, algunas de estas compañías se encuentran vinculadas a conglomerados industriales mientras que otras poseen acuerdos tradicionales a nivel de pool. En el campo de las líneas regulares es probable que las primeras empresas del ranking sostengan la atomización por debajo de ellas con el fin de controlar el transporte mediante vínculos con empresas de pequeña dimensión.

Top 10 container shipping companies in order of TEU capacity, first January 2006			
Company	TEU capacity	Market Share	Number of ships
A.P. Moller-Maersk Group	1,665,272	18.2%	549
Mediterranean Shipping Company S.A.	865,89	8.6%	299

⁸ NAVIS y COSMOS.

CMA CGM	507,954	5.6%	256
Evergreen Marine Corporation	477,911	5.2%	153
Hapag-Lloyd	412,344	4.5%	140
China Shipping Container Lines	346,493	3.8%	111
American President Lines	331,437	3.6%	99
Hanjin-Senator	328,794	3.6%	145
COSCO	322,326	3.5%	118
NYK Line	302,213	3.3%	105
TOTALES	1669167,36	59,90%	1975,00

Tabla 56 Ranking mundial de navieras⁹ en 2006

Algo parecido ocurre en cuanto a los operadores portuarios, con la particularidad de que algunas de las grandes navieras también poseen terminales propias o participaciones. En este sector existe una gran agresividad de los grandes grupos en su afán de aumentar sus cuotas de mercado. Podemos resumir la propiedad de los grandes operadores portuarios de containers en tres grupos:

- empresa privada
- autoridades portuarias
- armadores

⁹ Fuente: [Liner market shares](#). BRS report for Alphaliner (January 2006). [Consulta: 24 de febrero de 2007]. Disponible en: http://www.brs-paris.com/newsletters/liner_studies/no29/.

OPERADOR	MILLONES DE TEUS 2005	Cuota de Mercado
Hutchison Port Holdings (HPH)	33,2	8,3%
PSA International	32,4	8,1%
APM Terminals	24,1	6,0%
P&O Ports	21,9	3,3%
DP World	13,3	2,5%
Evergreen	11,5	1,7%
Eurogate	11,4	1,6%
China Ocean Shipping (Group) Company (COSCO)	8,1	1,5%
SSA Marine	6,7	1,4%
Hamburger Hafen- und Lagerhaus AG (HHLA)	5,7	1,3%

Tabla 57 Top 10 de Operadores globales de Terminales de containers¹⁰.

En resumen estamos asistiendo a un proceso de concentración de tráfico de contenedores que se extiende desde el control de buques y trayectos hasta los operadores portuarios. El transporte tiende a una visión más general de “cadena logística” del servicio en contraposición a un tratamiento más parcial, es por esta razón que los grandes grupos están adquiriendo terminales, almacenes, ferrocarriles, camiones y grandes áreas (Retroáreas) para el almacenamiento de containers.

Así pues la intensificación de los intercambios, la masificación de las cargas y la concentración de los tráficos alimentan la formación de mega-alianzas y líneas comerciales que conforman la jerarquía y el nuevo mapa empresarial en el sector marítimo.

Tendencia a la concentración del tráfico en pocos puertos de trasbordo (hub & spoke, relay ports e interliners)

Estamos asistiendo al nacimiento de una nueva geoestrategia marítima en la que las rutas de los transportes estarán en función de los puertos escogidos por los grandes transportistas globales. Esto es, aquellos puertos que determinan las rutas en función de su posición geográfica, potencialidad industrial de su hinterland y sus tarifas dentro de la red mundial de puertos.

¹⁰ Fuente: Drewry Shipping Consultants. Annual Review 2006.

De esta manera se creará una red mundial que relacionará el transporte a escala mundial con las zonas industrialmente más densas y con mayor potencial de comunicaciones con sus *hinterlands* respectivos.

La competitividad también se reflejará mediante la capacidad de los puertos en asumir la capacidad necesaria para atraer a las grandes alianzas de transportistas globales, a su vez estos tenderán a asegurar las rutas entre las diferentes partes del mundo. Por lo tanto los nuevos objetivos de los puertos están en ofrecer una mayor capacidad, costes más bajos, mayor fiabilidad y eficientes conexiones con los otros modos de transporte.

En resumen existen cuatro tipos de puertos según sus funciones:

- *Gateway*, puerto que fundamentalmente trabaja con contenedores de importación o exportación. Por ejemplo Nueva York y Barcelona.
- *Relay*, son puertos de trasbordo entre grandes rutas, es decir *mother vessel to mother vessel*. Por ejemplo Algeciras, Gioia Tauro, Singapur y Hong Kong.
- *Hub & Spoke*, son puertos de trasbordos situados dentro del eje principal de rutas y desde donde se distribuye hacia puertos menores de forma radial. Por ejemplo La Habana, y Kingston en el Caribe.
- Los *Interliners* son puertos menores que no dependen de un puerto principal o *hub*. Por ejemplo Alicante, Cartagena, etc.

En realidad muchos puertos no tienen una función pura sino que asumen todas las funciones anteriores en mayor o menor grado. Por ejemplo¹¹ Barcelona es *gateway* en un 70% aproximadamente pero también asume funciones de *Hub* y *Relay*, en cambio Algeciras es en un 95% trasbordo (*Hub + Relay*).

Como conclusión decir que la tendencia es que los grandes puertos aumenten su capacidad de muelles, almacenamiento, grúas y maquinaria para poder operar y absorber los grandes megabuques (VLCS y ULCS).

Reducción de la rotación de los grandes servicios a nivel mundial, es decir viajes redondos con menos puertos de escala.

Aumento de la capacidad de los buques hasta 14000 TEUS siendo realistas, buques mayores presentan problemas en cuanto a viabilidad de estructuras de puertos, vías de navegación (Canal de Suez por ejemplo) y maquinaria.

En resumen los transportistas globales en su conjunto establecerán una *short list* de los puertos de trasbordo minimizando sus rotaciones y en consecuencia sus gastos de escala, en contraposición incrementarán los costes de distribución aunque en conjunto calculan que el coste marginal descenderá.

En las tablas que siguen a continuación podemos ver la evolución del ranking mundial de puertos por número de TEUS movidos, una comparativa entre los puertos más

¹¹ En trasbordos enero de 2007 Barcelona tiene 37,9%, Valencia 30,6% y Algeciras 95%. Fuente Diario del Puerto, Barcelona 4 de abril de 2007.

importantes españoles y europeos y por último un gráfico de la evolución del puerto de Nueva York y una tabla que muestra la evolución del puerto de Amberes.

Para concluir en el anexo A resumimos las características y ratios de las principales terminales del mundo.

<u>Puerto</u>	<u>1998</u>	<u>% Variación</u> <u>1997/98</u>	<u>Puerto</u>	<u>1998</u>	<u>% Variación</u> <u>1997/98</u>
1 Singapur	15.100.000	7,1	52 Taichung	880.240	4,5
2 Hong Kong	14.582.000	1,4	53 Miami	860.000	13,0
3 Kaohsiung	6.271.053	10,1	54 Santos	859.500	3,6
4 Rotterdam	6.010.000	9,4	55 Southampton	846.257	-1,8
5 Pusan	5.752.955	9,0	56 Guangzhou	846.000	23,1
6 Long Beach	4.100.000	16,9	57 Haifa	833.500	24,6
7 Hamburgo	3.546.940	6,3	58 Sydney	801.081	9,7
8 Los Angeles	3.378.218	14,1	59 Vancouver	800.000	10,5
9 Amberes	3.265.000	10,0	60 Khorfakkan	783.352	4,5
10 Shanghai	3.000.000	15,8	61 Zeebrugge	776.357	19,8
11 Dubai	2.804.104	7,7	62 Jacksonville	753.823	11,6
12 Tokyo	2.495.000	4,7	63 La Spezia	731.882	18,9
13 New York/New Jersey	2.465.993	0,4	64 Port Everglades	704.390	-2,1
14 Felixstowe	2.461.823	9,3	65 Kingston	670.858	2,5
15 Gioia Tauro	2.100.000	45,0	66 Marsella	660.232	6,2
16 Kobe	2.100.000	8,0	67 Xiamen	654.000	26,5
17 Yokohama	2.091.420	-10,9	68 Nápoles	620.000	17,2
18 San Juan	1.990.272	15,0	69 Livorno	540.000	7,8
19 Manila	1.856.372	-12,5	70 Dalian	525.745	15,9
20 ALGECIRAS	1.825.614	18,7	71 Goteborg	519.642	-2,1
21 Klang	1.820.018	8,0	72 Penang	510.307	0,7
22 Bremerhaven	1.812.000	6,4	73 Nhava Sheva	504.149	19,1
23 Colombo	1.714.077	1,6	74 Mumbai	503.310	-16,3
24 Keelung	1.621.222	-18,2	75 Auckland	499.285	7,6
25 Tanjung Priok	1.609.340	-3,7	76 LAS PALMAS	490.577	28,0
26 Oakland	1.575.406	2,9	77 Liverpool	487.000	5,9
27 Seattle	1.544.000	4,6	78 Baltimore	486.861	2,3
28 Nagoya	1.458.076	-2,7	79 Cabello	486.774	35,1
29 Laem Chabang	1.425.000	37,7	80 Savannah	485.011	3,9
30 Le Havre	1.320.000	11,9	81 Fujairah	480.000	-12,7
31 Qingdao	1.213.000	17,4	82 Tilbury	464.806	16,8
32 Buenos Aires	1.139.730	11,3	83 Shekou	463.000	117,0
33 Charleston	1.277.514	4,9	84 Johor	460.000	7,1
34 Génova	1.265.593	7,3	85 Puerto Limón	452.076	4,9
35 Hampton Roads	1.251.891	1,6	86 Halifax	435.425	-5,2
36 Osaka	1.155.974	-4,0	87 Dublín	424.500	11,3
37 Tacoma	1.156.500	-0,2	88 San Antonio	415.001	30,2
38 Manzanillo	1.117.035	92,0	89 Guayaquil	407.434	8,4
39 Bangkok	1.113.756	1,3	90 Izmir	399.755	3,0
40 BARCELONA	1.095.113	12,7	91 Damman	386.862	7,8
41 Hawaii	1.082.346	1,5	92 Callao	378.013	17,6
42 Tianjin	1.065.900	14,0	93 BILBAO	367.841	8,2
43 Melbourne	1.044.000	1,4	94 Lisboa	340.786	2,3
44 Yantian	1.038.000	62,7	95 Ashdod	364.000	-8,5
45 VALENCIA	1.005.397	20,9	96 Hakata	362.992	6,0
46 Malta	1.071.669	61,7	97 Puerto Cortés	362.064	17,1
47 Jeddah	967.931	5,1	98 Thamesport	360.000	38,5
48 Houston	968.169	3,7	99 Ningbo	353.000	37,4
49 Durban	955.450	1,1	100 Veracruz	339.312	18,0
50 Pireo	933.096	36,4			
51 Montreal	932.701	7,2	TOTAL	153.083.868	8,3

Tabla 58 Ranking¹² de los 100 primeros puertos en tráfico de contenedores con incrementos anuales. 1997 / 1998.

¹² Diario Marítimas

WORLD PORT RANKING - 1998							
RANK	CARGO VOLUME, METRIC TONS (000s)			RANK	CONTAINER TRAFFIC, TEUs (000s)		
	PORT	COUNTRY	TONS		PORT	COUNTRY	TEUs
1	Singapore	Singapore	313,322	1	Singapore	Singapore	15,136
2	Rotterdam	Netherlands	306,859	2	Hong Kong	China	14,582
3	South Louisiana	USA	178,515	3	Kaohsiung	Taiwan	6,271
4	Hong Kong	China	167,170	4	Rotterdam	Netherlands	6,004
5	Shanghai	China	166,000	5	Busan	South Korea	4,539
6	Chiba	Japan	164,060	6	Long Beach	USA	4,098
7	Houston (TX)	USA	153,482	7	Hamburg	Germany	3,566
8	Ulsan	South Korea	148,332	8	Los Angeles	USA	3,378
9	Nagoya	Japan	133,863	9	Antwerp	Belgium	3,266
10	New York/New Jersey	USA	124,862	10	Shanghai	China	3,066
11	Antwerp	Belgium	119,789	11	Dubai	UAE	2,804
12	Yokohama	Japan	117,820	12	Tokyo	Japan	2,495
13	Kwangyang	South Korea	114,964	13	New York/New Jersey	USA	2,466
14	Kobe	Japan	100,048	14	Gioia Tauro	Italy	2,126
15	Kaohsiung	Taiwan	98,203	15	Yokohama	Japan	2,091
16	Busan	South Korea	96,434	16	San Juan	USA	1,990
17	Inchon	South Korea	93,948	17	Kobe	Japan	1,901
18	Marseilles	France	93,421	18	Manila	Philippines	1,855
19	Tokyo	Japan	88,392	19	Algeciras	Spain	1,826
20	Kitayushu	Japan	87,346	20	Port Kelang	Malaysia	1,820
21	Osaka	Japan	86,689	21	Bremen Ports	Germany	1,811
22	Richards Bay	South Africa	86,064	22	Colombo	Sri Lanka	1,714
23	New Orleans (LA)	USA	80,584	23	Felixstowe	UK	1,712
24	Corpus Christi (TX)	USA	78,234	24	Keelung	Taiwan	1,707
25	Hamburg	Germany	76,263	25	Oakland	USA	1,575
26	Vancouver (BC)	Canada	71,933	26	Seattle	USA	1,544
27	Dampier	Australia	71,333	27	Nagoya	Japan	1,458
28	Newcastle	Australia	70,942	28	Laem Chabang	Thailand	1,425
29	Tubarao	Brazil	69,575	29	Tanjung Priok	Indonesia	1,425
30	Port Hedland	Australia	67,230	30	London	UK	1,334
31	LeHavre	France	66,407	31	LeHavre	France	1,319
32	Baton Rouge (LA)	USA	60,673	32	Charleston	USA	1,278
33	Hampton Roads (VA)	USA	60,663	33	Genoa	Italy	1,266
34	Plaquemines (LA)	USA	59,738	34	Hampton Roads	USA	1,252
35	London	UK	56,374	35	Dublin	Ireland	1,191
36	Valdez (AK)	USA	56,235	36	Tacoma	USA	1,156
37	Amsterdam	Netherlands	55,734	37	Buenos Aires	Argentina	1,138
38	Beaumont (TX)	USA	54,515	38	Melbourne	Australia	1,125
39	Long Beach (CA)	USA	52,421	39	Bangkok	Thailand	1,114
40	Tees and Hartlepool	UK	51,455	40	Barcelona	Spain	1,095
41	Itaquí	Brazil	50,268	41	Durban	South Africa	1,080
42	Lake Charles (LA)	USA	48,629	42	Valencia	Spain	1,005
43	Grimsby and Immingham	UK	48,387	43	Houston	USA	968
44	Tampa (FL)	USA	48,316	44	Jeddah	Saudi Arabia	968
45	Pittsburg h(PA)	USA	48,027	45	Piraeus	Greece	933
46	Pohang	South Korea	47,552	46	Montreal	Canada	933
47	Port Kelang	Malaysia	47,341	47	Taichung	Taiwan	880
48	Trieste	Italy	47,217	48			
49	Texas City (TX)	USA	44,916	49			
50	Genoa	Italy	44,874	50			

Tabla 59 Ranking mundial comparativo por toneladas y TEUS de 1998¹³.

¹³ Fuente: *AAPA Advisory; Shipping Statistics Yearbook 1998; Containerisation International Yearbook; U.S. Army Corps of Engineers, Waterborne Commerce of the United States CY 1998; various port authority internet sites.*

WORLD PORT RANKING - 2002								
TOTAL CARGO VOLUME, METRIC TONS (000s)					CONTAINER TRAFFIC (TEUS, 000s)			
RANK	PORT	COUNTRY	MEASURE	TONS	RANK	PORT	COUNTRY	TEUS
1	Singapore	Singapore	MT	335.156	1	Hong Kong	China	19.144
2	Rotterdam	Netherlands	MT	321.851	2	Singapore	Singapore	16.941
3	Shanghai	China	MT	238.606	3	Busan	South Korea	9.436
4	South Louisiana (LA)	United States	MT	196.445	4	Shanghai	China	8.620
5	Hong Kong	China	MT	192.510	5	Kaohsiung	Tawian	8.493
6	Houston (TX)	United States	MT	161.190	6	Shenzhen	China	7.614
7	Chiba	Japan	FT	158.929	7	Rotterdam	Netherlands	6.515
8	Nagoya	Japan	FT	158.020	8	Los Angeles	United States	6.106
9	Kwangyang	South Korea	RT	153.447	9	Hamburg	Germany	5.374
10	Ningbo	China	MT	150.000	10	Antwerp	Belgium	4.777
11	Ulsan	South Korea	RT	148.412	11	Port Kelang	Malaysia	4.533
12	Inchon	South Korea	RT	146.181	12	Long Beach	United States	4.524
13	Busan	South Korea	RT	143.772	13	Dubai	United Arab Emirates	4.194
14	Guangzhou	China	MT	140.395	14	Yantian	China	4.181
15	Antwerp	Belgium	MT	131.629	15	New York/New Jersey	United States	3.749
16	Kaohsiung	Taiwan	MT	129.414	16	Qingdao	China	3.410
17	Tianjin	China	MT	129.000	17	Bremen/Bremerhafen	Germany	3.032
18	New York/New Jersey	United States	MT	122.103	18	Gioia Tauro	Italy	2.954
19	Qinhuangdao	China	MT	121.152	19	Felixstowe	United Kingdom	2.750
20	Qingdao	China	MT	120.000	20	Tokyo	Japan	2.712
21	Yokohama	Japan	FT	118.072	21	Tanjung Priok	Indonesia	2.680
22	Dalian	China	MT	107.538	22	Tanjung Pelepas	Indonesia	2.660
23	Hamburg	Germany	MT	98.272	23	Laem Chabang	Thailand	2.657
24	Marseilles	France	MT	92.261	24	Manila	Philippines	2.462
25	Dampier	Australia	MT	92.228	25	Tianjin	China	2.410
26	Osaka	Japan	FT	86.499	26	Yokohama	Japan	2.365
27	Kitakyushu	Japan	FT	84.249	27	Algeciras	Spain	2.234
28	Tokyo	Japan	FT	82.945	28	Guangzhou	China	2.180
29	Port Kelang	Malaysia	FT	82.271	29	Kobe	Japan	1.993
30	Port Hedland	Australia	MT	81.758	30	Jawaral Nehru	India	1.967
31	Richards Bay	South Africa	HT	81.509	31	Nagoya	Japan	1.927
32	Kobe	Japan	FT	78.601	32	Keelung	Taiwan	1.919
33	Beaumont (TX)	United States	MT	77.990	33	Ningbo	China	1.860
34	New Orleans (LA)	United States	MT	77.163	34	Valencia	Spain	1.821
35	Newcastle	Australia	MT	76.887	35	Colombo	Sri Lanka	1.765
36	Shenzhen	China	MT	75.882	36	Xiamen	China	1.750
37	Tubarão	Brazil	MT	75.865	37	LeHavre	France	1.720
38	Hay Point	Australia	MT	74.672	38	Oakland	United States	1.708
39	Huntington, WV	United States	MT	73.590	39	Melbourne	Australia	1.600
40	Amsterdam	Netherlands	MT	70.417	40	Charleston	United States	1.593
41	LeHavre	France	MT	67.698	41	Genoa	Italy	1.531
42	Corpus Christi (TX)	United States	MT	65.362	42	Osaka	Japan	1.515
43	Itaqui	Brazil	MT	64.942	43	Tacoma (WA)	United States	1.471
44	Novorossiysk	Russia	MT	63.291	44	Barcelona	Spain	1.461

ANEXO A

45	Vancouver	Canada	MT	62.801	45	Vancouver (BC)	Canada	1.458
46	Long Beach (CA)	United States	MT	61.615	46	Seattle	United States	1.439
47	Baton Rouge (LA)	United States	MT	54.997	47	Hampton Roads	United States	1.438
48	Gladstone	Australia	MT	54.466	48	Tanjung Perak	Indonesia	1.418
49	Plaquemines (LA)	United States	MT	53.661	49	Piraeus	Greece	1.405
50	Santos	Brazil	MT	53.474	50	Jeddah	Saudi Arabia	1.367
Abbreviations: MT=Metric Ton HT= Harbor Ton. FT=Freight Ton. RT = Revenue Ton.								
NOTE: <i>The cargo rankings based on tonnage should be interpreted with caution since these measures are not directly comparable and cannot be converted to a single, standardized unit.</i>								
Sources: <i>Shipping Statistics Yearbook 2003; Containerisation International Yearbook 2004; U.S. Army Corps of Engineers, Waterborne Commerce of the United States CY 2002; AAPA Advisory, May 12, 2003; various port authority internet sites.</i>								

Tabla 60 Ranking mundial comparativo por toneladas y TEUS 2002.

WORLD PORT RANKING - 2003					
Rank	Port	Country	TEUS(000s) ^{EU}	+/- from 2002	% change from 2002
1	Hong Kong	People's Republic of China	20,499	1,355	7.08
2	Singapore	Singapore	18,411	1,470	8.68
3	Shanghai	People's Republic of China	11,280	2,660	30.86
4	Shenzhen	People's Republic of China	10,615	3,001	39.41
5	Busan	South Korea	10,408	972	10.30
6	Kaohsiung	Taiwan (Republic of China)	8,843	350	4.12
7	Los Angeles	United States of America	7,149	668	13.98
8	Rotterdam	Netherlands	7,107	592	9.09
9	Hamburg	Germany	6,138	764	14.22
10	Antwerp	Belgium	5,445	1,043	17.08
11	Dubai	United Arab Emirates	5,152	958	22.84
12	Klang	Malaysia	4,840	307	6.77
13	Long Beach	United States	4,658	134	2.96
14	Qingdao	People's Republic of China	4,239	829	24.31
15	New York/New Jersey	United States	4,068	319	8.51
16	Tanjung Pelepas	Malaysia	3,487	827	31.09
17	Tokyo	Japan	3,314	602	22.20
18	Bremen/Bremerhaven	Germany	3,190	158	5.21
19	Laem Chabang	Thailand	3,181	524	19.72
20	Gioia Tauro	Italy	3,149	195	6.60
21	Tianjin	People's Republic of China	3,015	605	25.10
22	Ningbo	People's Republic of China	2,772	912	49.03
23	Guangzhou	People's Republic of China	2,762	582	26.70
24	Tanjung Priok	Indonesia	2,758	78	2.91
25	Manila	Philippines	2,552	90	3.66
26	Algeciras	Spain	2,516	282	12.62
27	Yokohama	Japan	2,505	140	5.92
28	Felixstowe	United Kingdom	2,500	-250	-9.09

29	Xiamen	People's Republic of China	2,331	581	33.20
30	Jawaharlal Nehru	India	2,269	302	15,35
31	Nagoya	Japan	2,074	147	7.63
32	Kobe	Japan	2,046	53	2.66
33	Keelung	Taiwan (Republic of China)	2,001	82	4.27
34	Salalah	Oman	2,000		
35	Valencia	Spain	1,993	172	9.45
36	Le Havre	France	1,977	257	14.94
37	Colombo	Sri Lanka	1,959	194	10.99
38	Oakland	United States	1,923	215	12.59
39	Jeddah	Saudi Arabia	1,777	410	29.99
40	Tacoma	United States	1,738	267	18.15
41	Melbourne	Australia	1,721	121	7.56
42	Charleston	United States	1,691	98	6.15
43	Dalian	People's Republic of China	1,670		
44	San Juan	United States	1,666		
45	Barcelona	Spain	1,652	191	13.07
46	Hampton Roads	United States	1,646	208	14.46
47	Osaka	Japan	1,610	95	6.27
48	Genoa	Italy	1,606	75	4.90
49	Piraeus	Greece	1,605	200	14.23
50	Tanjung Perak	Indonesia	1,575	157	11.07

Tabla 61 Ranking mundial¹⁴ comparativo por TEUS 2003.

¹⁴ Fuente: Hamburg Port Authority Rankings. [Consulta: 3 de Marzo de 2007]. Disponible en: http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_world%27s_busiest_container_ports.

ANEXO A

WORLD PORT RANKING - 2004								
TOTAL CARGO VOLUME, METRIC TONS (000s)					CONTAINER TRAFFIC (TEUS, 000s)			
RANK	PORT	COUNTRY	MEASURE	TONS	RANK	PORT	COUNTRY	TEUS
1	Singapore	Singapore	FT	393.418	1	Hong Kong	China	21.984
2	Shanghai	China	MT	378.962	2	Singapore	Singapore	21.329
3	Rotterdam	Netherlands	MT	352.563	3	Shanghai	China	14.557
4	Ningbo	China	MT	225.850	4	Shenzhen	China	13.615
5	Hong Kong	China	MT	220.879	5	Busan	South Korea	11.430
6	Busan	South Korea	RT	219.760	6	Kaohsiung	Taiwan	9.714
7	Guangzhou	China	MT	215.190	7	Rotterdam	Netherlands	8.281
8	Tianjin	China	MT	206.161	8	Los Angeles	United States	7.321
9	South Louisiana, LA	United States	MT	203.517	9	Hamburg	Germany	7.003
10	Houston, TX	United States	MT	183.419	10	Dubai	United Arab Emirates	6.429
11	Nagoya	Japan	FT	182.289	11	Antwerp	Belgium	6.064
12	Chiba	Japan	FT	169.254	12	Long Beach	United States	5.780
13	Kwangyang	South Korea	RT	165.875	13	Port Kelang	Malaysia	5.244
14	Qingdao	China	MT	161.650	14	Qingdao	China	5.140
15	Ulsan	South Korea	RT	156.517	15	New York/New Jersey	United States	4.478
16	Kaohsiung	Taiwan	MT	152.468	16	Tanjung Pelepas	Malaysia	4.020
17	Antwerp	Belgium	MT	152.327	17	Ningbo	China	4.006
18	Qinhuangdao	China	MT	150.320	18	Tianjin	China	3.814
19	Dalian	China	MT	145.162	19	Tanjung Priok	Indonesia	3.597
20	New York/New Jersey	United States	MT	138.328	20	Laem Chabang	Thailand	3.529
21	Shenzhen	China	MT	135.246	21	Bremen/Bremerhafen	Germany	3.469
22	Yokohama	Japan	FT	126.960	22	Tokyo	Japan	3.358
23	Hamburg	Germany	MT	114.484	23	Guangzhou	China	3.308
24	Inchon	South Korea	RT	113.073	24	Gioia Tauro	Italy	3.261
25	Port Hedland	Australia	MT	108.500	25	Algeciras	Spain	2.937
26	Kitakyushu	Japan	FT	103.245	26	Yantian	China	2.872
27	Port Kelang	Malaysia	FT	99.911	27	Yokohama	Japan	2.718
28	Marseilles	France	MT	94.093	28	Manila	Philippines	2.698
29	Osaka	Japan	FT	93.147	29	Felixstowe	United Kingdom	2.675
30	Tokyo	Japan	FT	91.427	30	Jeddah	Saudi Arabia	2.426
31	Dampier	Australia	MT	87.928	31	Jwarharlal Nehru	India	2.361
32	Kobe	Japan	FT	85.661	32	Salalah	Oman	2.229
33	Hay Point	Australia	MT	85.559	33	Colombo	Sri Lanka	2.221
34	Richards Bay	South Africa	HT	84.954	34	Dalian	China	2.211
35	Tubarão	Brazil	MT	84.433	35	Kobe	Japan	2.177
36	Newcastle	Australia	MT	83.560	36	Nagoya	Japan	2.155
37	Beaumont, TX	United States	MT	83.243	37	Valencia	Spain	2.145
38	Dubai	United Arab Emirates	MT	77.380	38	LeHavre	France	2.132
39	Itaqui	Brazil	MT	76.958	39	Keelung	Taiwan	2.070
40	LeHavre	France	MT	76.175	40	Oakland	United States	2.043
41	Vancouver	Canada	MT	73.574	41	Osaka	Japan	2.009
42	Amsterdam	Netherlands	MT	73.176	42	Hampton Roads	United States	1.982
43	Long Beach, CA	United States	MT	72.684	43	Melbourne	Australia	1.910

ANEXO A

44	Corpus Christi, TX	United States	MT	71.648	44	Barcelona	Spain	1.883
45	New Orleans, LA	United States	MT	70.886	45	Santos	Brazil	1.883
46	Huntington - Tristate	United States	MT	70.180	46	Charleston	United States	1.864
47	Santos	Brazil	MT	67.609	47	Khor Fakkan	United Arab Emirates	1.819
48	Gladstone	Australia	MT	63.148	48	Tacoma	United States	1.798
49	Texas City, TX	United States	MT	61.987	49	Seattle	United States	1.776
50	Algeciras	Spain	MT	61.294	50	Durban	South Africa	1.717
Abbreviations: MT=Metric Ton HT= Harbor Ton. FT=Freight Ton. RT = Revenue Ton.								
NOTE: <i>The cargo rankings based on tonnage should be interpreted with caution since these measures are not directly comparable and cannot be converted to a single, standardized unit.</i>								
Sources: <i>Shipping Statistics Yearbook 2005; Containerisation International Yearbook 2006; U.S. Army Corps of Engineers, Waterborne Commerce of the United States CY 2004; AAPA Advisory, May 8, 2006; various port authority internet sites.</i>								

Tabla 62 Ranking mundial comparativo por toneladas y TEUS 2004.

WORLD PORT RANKING - 2005					
Rank	Port	Country	TEUS(000s) ¹¹	+/- from 2004	% change from 2004
1	Singapore	Singapore	23,200	1,900	8.19
2	Hong Kong	People's Republic of China	22,430	500	2.28
3	Shanghai	People's Republic of China	18,090	3,536	24.30
4	Shenzhen	People's Republic of China	16,200	2,540	19.00
5	Busan	South Korea	11,840	349	2.95
6	Kaohsiung	Taiwan (Republic of China)	9,471	424	6.54
7	Rotterdam	Netherlands	9,300	1,000	12.05
8	Hamburg	Germany	8,086	1,084	13.40
9	Dubai	United Arab Emirates	7,619	1,190	15.63
10	Los Angeles	United States of America	7,485	164	2.19
11	Long Beach	United States of America	6,710	930	13.85
12	Antwerp	Belgium	6,325	-239	-2.46
13	Qingdao	People's Republic of China	6,307	1,168	18.52
14	Port Kelang	Malaysia	5,544	299	5.39
15	Ningbo	People's Republic of China	5,208	1,203	23.09
16	Tianjin	People's Republic of China	4,801	987	20.58
17	New York/New Jersey	United States of America	4,793	315	6.57
18	Tanjung Pelepas	Malaysia	4,169	149	3.57
19	Laem Chabang	Thailand	3,766	142	3.77
20	Tokyo	Japan	3,594	14	0.04

Tabla 63 Ranking mundial¹⁵ comparativo por TEUS 2005 (preliminar).

¹⁵ Fuente: Hamburg Port Authority Rankings. [Consulta: 3 de Marzo de 2007]. Disponible en: http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_world%27s_busiest_container_ports.

Container throughput in TEU (Twenty Foot Equivalent Units)										
Year	2005	2004	2003	2002	2001	2000	1999	1998	1997	1996
Port										
BARCELONA	2041480	1916493	1652366	1461232	1411054	1387392	1234987	1095113	971921	767236
VALENCIA	2397915	2145236	1992903	1821005	1506805	1308010	1170191	1005797	831510	708332
ALGECIRAS	3179614	2937381	2517318	2234248	2151770	2009122	1832557	1825614	1537627	1306825

Tabla 64 Comparativa entre los tres puertos más importantes de España¹⁶.

PUERTO	BARCELONA	INC%	VALENCIA	INC%	ALGECIRAS	INC%
año						
2005	2041480	7%	2397915	12%	3179614	8%
2004	1916493	16%	2145236	8%	2937381	17%
2003	1652366	13%	1992903	9%	2517318	13%
2002	1461232	4%	1821005	21%	2234248	4%
2001	1411054	2%	1506805	15%	2151770	7%
2000	1387392	12%	1308010	12%	2009122	10%
1999	1234987	13%	1170191	16%	1832557	0%
1998	1095113	13%	1005797	21%	1825614	19%
1997	971921	27%	831510	17%	1537627	18%
1996	767236		708332		1306825	

Tabla 65 Comparativa entre los tres puertos más importantes de España¹⁷.

¹⁶ Fuente: Hamburg Port Authority Rankings. [Consulta: 3 de Marzo de 2007]. Disponible en: http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_world%27s_busiest_container_ports.

¹⁷ Elaboración propia.

Rank 2004	Port	2000		2002		2003		2004		Growth 2003-2004	
		Total	of which empty	Total	of which empty	Total	of which empty	Total	of which empty	Total (%)	of which empty (%)
1	Rotterdam (NL)	6 253	880	6 505	1 055	7 118	1 272	8 242	1 455	15.8%	14.4%
2	Hamburg (DE)	4 275	542	5 376	710	6 126	855	7 004	922	14.3%	7.8%
3	Antwerpen (BE) ⁽²⁾	2 641	188	3 153	159	4 012	169	5 055	526	26.0%	211.2%
4	Bremen & Bremehaven (DE)	2 643	375	3 032	481	3 191	487	3 529	539	10.6%	10.7%
5	Gioia Tauro (IT)	2 575	466	2 883	459	3 094	527	3 170	575	2.5%	9.1%
6	Felixstowe (UK)	2 825	527	2 682	659	2 482	630	2 717	718	9.5%	14.0%
7	Le Havre (FR)	1 334	257	1 754	283	2 015	366	2 158	322	7.1%	-12.0%
8	Valencia (ES)	1 313	404	1 826	545	2 012	564	2 156	540	7.2%	-4.3%
9	Barcelona (ES)	1 389	353	1 122	258	1 765	554	2 084	543	18.1%	-2.0%
10	Piraeus (EL)	1 096	238	1 395	249	1 606	269	1 551	290	-3.4%	7.8%
11	Genova (IT)	1 179	38	1 499	376	1 591	394	1 437	361	-9.7%	-8.4%
12	Southampton (UK)	1 092	256	1 275	309	1 375	478	1 435	498	4.4%	4.2%
13	Las Palmas, Gran Canaria (ES)	648	210	726	230	966	288	1 111	304	15.0%	5.6%
14	Algeciras (ES) ⁽³⁾	:	:	1 732	0	2 024	0	970	0	-52.1%	:
15	London (UK)	573	129	875	228	895	288	966	306	7.9%	6.3%
16	Marseille (FR)	725	149	811	176	835	166	920	166	10.2%	0.0%
17	La Spezia (IT)	661	37	780	104	836	86	879	119	5.1%	38.4%
18	Göteborg (SE)	652	162	725	198	634	132	722	155	13.9%	17.4%
19	Medway (UK)	515	94	528	122	517	166	672	214	30.0%	28.9%
20	Liverpool (UK)	541	74	488	79	565	109	601	115	6.4%	5.5%

(1) TEU = Twenty-foot Equivalent Unit (unit of volume equivalent to a 20 foot ISO container). (2) partial data up to 2nd quarter 2004. Thus the growth rates 2003-2004 are over-estimated. (3) data for 2004 are provisional.

Tabla 66 Top 20 en TEUS de los puertos europeos en el 2004¹⁸.

¹⁸ EUROSTAT. [Consulta: 8 de marzo de 2007]. Disponible en: http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page?_pageid=1090_30070682_1090_33076576&_dad=portal&_sc_hema=PORTAL

r

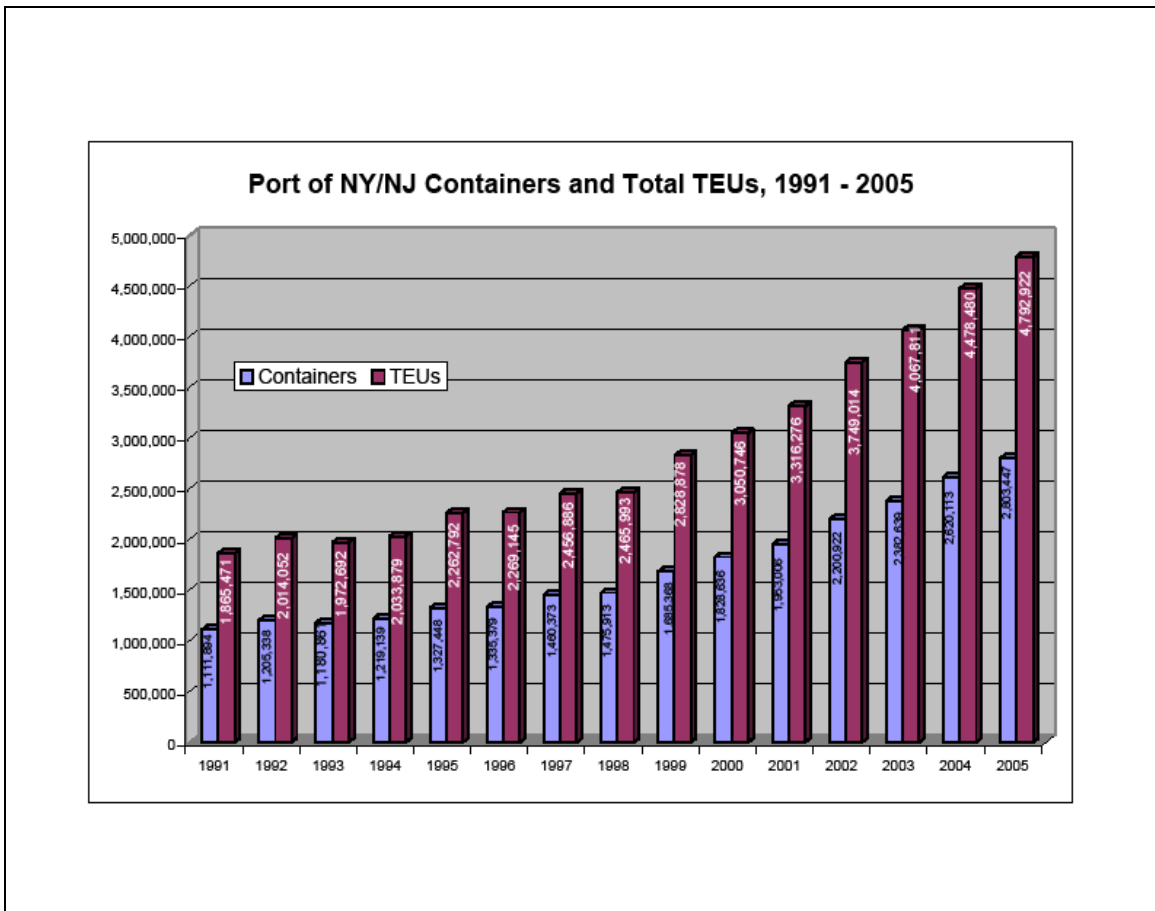


Gráfico 44 Puerto de New York/New Jersey¹⁹, histórico de 1991 al 2005 por contenedores y TEUS

¹⁹ Fuente: Port Authority of New York / New Jersey. [Consulta: 24 de febrero de 2007].
Disponible en: <http://www.panynj.gov/DoingBusinessWith/seaport/pdfs/Container&TEUS.pdf>.

Year	Unloaded	Loaded	Total
1975	178,097	178,097	356,194
1980	368,675	355,572	724,247
1985	612,565	630,444	1,243,009
1990	765,262	783,851	1,549,113
1995	1,146,007	1,183,128	2,329,135
1996	1,296,430	1,357,479	2,653,909
1997	1,461,382	1,507,807	2,969,189
1998	1,630,874	1,634,876	3,265,750
1999	1,793,314	1,820,932	3,614,246
2000	2,005,357	2,076,977	4,082,334
2001	2,084,471	2,133,705	4,218,176
2002	2,343,775	2,433,376	4,777,151
2003	2,642,338	2,803,100	5,445,437
2004	2,946,297	3,117,450	6,063,746
2005	3,150,351	3,331,678	6,482,029
2006	3,435,463	3,583,336	7,018,799

Port of Antwerp — History of container traffic(in TEU)

Tabla 67 Evolución de la producción en Amberes que ocupa el 9º lugar a nivel mundial.

11 ANEXO B

Terminales Marítimas.

Para concluir haremos un resumen de las principales terminales del mundo teniendo en cuenta las siguientes consideraciones previas:

- Para que los datos sean lo más homogéneos posible se han tomado datos del año 2004.
- La clasificación es por zonas geográficas debido a que guardan una cierta similitud en cuanto a tipo de maquinaria, sistema operativo y *layout*.
- Los datos han sido tomados de las respectivas *Webs* confiando en la fidelidad y actualización de los datos suministrados.
- No siempre ha sido posible reunir todos los parámetros deseados pero en cualquier caso se ha intentado dar una idea de la capacidad estructural y operativa de cada una las terminales.
- Se ha utilizado un formato único con el fin de facilitar la visualización y la comparativa.
- Se han utilizado los tres ratios al uso en lo que se refiere a la eficiencia estructural de las terminales, TEUs por metro de muelle, TEUs por hectárea y Profundidad de muelle.

EUROPA

BARCELONA

Longitud de Muelle (m)	1380	Grúas	9
Profundidad de agua (m)	12-16	Maquinaria Explanada transtainers	53 SC + 5 FLT +1 RMG
Superficie (Ha)	54	Terminal Ferroviaria (nº vías)	4 x 420
Tráfico (TEUS año)	930000	Nº Carriles Puerta	8
% TRB	32%	Sistema Informático	propio
Huellas	10600	Almacén m ²	14400
Conexiones Frigoríficos	284		
Entrada-Salida (%Tráficos)			
Ratio TEU/Muelle	674	Ratio Muelle/Grúa Holgura grúas	153
Ratio TEU/Ha	17222		
Profundidad de Explanada (m)	391		
TT= tractoras; PL= plataformas; RS=Reachstacker			

Tabla 68 TERMINAL DE CONTENIDORS DE BARCELONA, Grup TCB S.L.Fuente; www.tcbcn.com.

ALGECIRAS

Longitud de Muelle (m)	1762	Grúas	16
Profundidad de agua (m)	9-16	Maquinaria Explanada transtainers	46 RTG
Superficie (Ha)	69	Terminal Ferroviaria (nº vías)	2 vías
Tráfico (TEUS año)	2590000	Nº Carriles Puerta	6
% TRB	95%	Sistema Informático	propio
Huellas	11000 aprox.	Almacén m ²	8860
Conexiones Frigoríficos	1944		
Entrada-Salida (%Tráficos)			
Ratio TEU/Muelle	1470	Ratio Muelle/Grúa Holgura grúas	110
Ratio TEU/Ha	37536		
Profundidad de Explanada (m)	392		
TT= tractoras; PL= plataformas; RS=Reachstacker			

Tabla 69 APM ALGECIRAS, APM. Fuente: www.apmterminals.com.

VALENCIA

Longitud de Muelle (m)	1500	Grúas	12
Profundidad de agua (m)	16	Maquinaria Explanada transtainers	33 RTG
Superficie (Ha)	100	Terminal Ferroviaria (nº vías)	5 x 650
Tráfico (TEUS año)	1500000	Nº Carriles Puerta	14
% TRB		Sistema Informático	
Capacidad en TEUS	33000	Almacén m ²	8000
Conexiones Frigoríficos	500		
Entrada-Salida (%Tráficos)			
Ratio TEU/Muelle	1000	Ratio Muelle/Grúa Holgura grúas	125

Ratio TEU/Ha	15000		
Profundidad de Explanada (m)	667		
TT= tractoras; PL= plataformas; RS=Reachstacker			

Tabla 70 MARITIMA VALENCIANA, Grupo Dragados.

Fuente: www.marvalsa.com.

HAMBURGO

Longitud de Muelle (m)	2850	Grúas	18
Profundidad de agua (m)	16,5	Maquinaria Explanada Sraddlecarrier	100 SC + 4 RMG
Superficie (Ha)	160	Terminal Ferroviaria (nº vías)	4 x 1000
Tráfico (TEUS año)	2600000	Nº Carriles Puerta	
% TRB		Sistema Informático	Propio
Huellas	15000	Almacén m ²	68000
Conexiones Frigos	950		
Ratio TEU/Muelle	912,280702	Ratio Muelle/Grúa Holgura grúas	158,33
Ratio TEU/Ha	16250		
Profundidad de Explanada (m)	561		

Tabla 71 Terminal de BURCHARDKAI de Hamburger Hafen und Lagerhaus-AG (HHLA). Fuente www.hhla.de

Longitud de Muelle (m)	1400	Grúas	15
Profundidad de agua (m)	16,7	Maquinaria Explanada Sraddlecarrier	65 AGV + 48 RMG automáticos
Superficie (Ha)	78	Terminal Ferroviaria (nº vías)	6 x 700
Tráfico (TEUS año)	1900000	Nº Carriles Puerta	18
% TRB	28%	Sistema Informático	propio
Huellas	7040	Almacén m ²	90000
Conexiones Frigos	1600		

Entrada-Salida (%Tráficos)	45% camión; 27% tren; 28% TRB		
Ratio TEU/Muelle	1357,14286	Ratio Muelle/Grúa Holgura grúas	93,33
Ratio TEU/Ha	24358,9744		
Profundidad de Explanada (m)	557		

Tabla 72 Terminal de ALTENWERDER de HHLA. Fuente: www.hhla.de .

Longitud de Muelle (m)	2100	Grúas	17
Profundidad de agua (m)	15,5	Maquinaria Explanada Sraddlecarrier	70 SC + 4 RMG
Superficie (Ha)	120	Terminal Ferroviaria (nº vías)	5 x700
Tráfico (TEUS año)	2000000	Nº Carriles Puerta	
% TRB		Sistema Informático	
Huellas	25000	Almacén m ²	
Conexiones Frigos	600		
Entrada-Salida (%Tráficos)			
Ratio TEU/Muelle	952,380952	Ratio Muelle/Grúa Holgura grúas	123,53
Ratio TEU/Ha	16666,6667		
Profundidad de Explanada (m)	571		

Tabla 73 EUROKAI Container Terminal Hamburg GmbH. Fuente: www.eurogate.de .

BREMERHAVEN

Longitud de Muelle (m)	3237	Grúas	21
Profundidad de agua (m)	14,5	Maquinaria Explanada Sraddlecarrier	66

Superficie (Ha)	200	Terminal Ferroviaria (n° vías)	
Tráfico (TEUS año)	3200000	N° Carriles Puerta	
% TRB		Sistema Informático	
Huellas	16000	Almacén m ²	
Conexiones Frigos	700		30000
Entrada-Salida (%Tráficos)			
Ratio TEU/Muelle	989	Ratio Muelle/Grúa Holgura grúas	154
Ratio TEU/Ha	16000		
Profundidad de Explanada (m)	618		

Tabla 74 EUROGATE Container Terminal Bremerhaven GMBH. Fuente: www.eurogate.de .

Longitud de Muelle (m)	1100	Grúas	10
Profundidad de agua (m)	14	Maquinaria Explanada Saddlecarrier	43
Superficie (Ha)	68	Terminal Ferroviaria (n° vías)	6 x 900
Tráfico (TEUS año)	1800000	N° Carriles Puerta	2
% TRB		Sistema Informático	NAVIS
Huellas	11318	Almacén m ²	
Conexiones Frigos	1499		
Entrada-Salida (%Tráficos)			
Ratio TEU/Muelle	1636	Ratio Muelle/Grúa Holgura grúas	110
Ratio TEU/Ha	26471		
Profundidad de Explanada (m)	618		

Tabla 75 NORTH SEA Terminal Bremerhaven. Join venture entre Eurogate y APM. Fuente: www.ntb-bremerhaven.de .

AMBERES

Longitud de Muelle (m)	1125	Grúas	9
Profundidad de agua (m)	14,5	Maquinaria Explanada	60 SC + 1 RMG
Superficie (Ha)	80	Terminal Ferroviaria (nº vías)	
Tráfico (TEUS año)	1320000	Nº Carriles Puerta	
% TRB		Sistema Informático	COSMOS
Huellas	11318	Almacén m ²	
Conexiones Frigos	660		
Entrada-Salida (%Tráficos)			
Ratio TEU/Muelle	1173	Ratio Muelle/Grúa Holgura grúas	125
Ratio TEU/Ha	16500		
Profundidad de Explanada (m)	711		

Tabla 76 NOORDZEE Terminal. Hesse Noord Natie (HNN). PSA posee un 65% desde abril de 2001. Fuente: www.hnn.be.

Longitud de Muelle (m)	2750	Grúas	24
Profundidad de agua (m)	14,5	Maquinaria Explanada	130 SC + 1 RMG
Superficie (Ha)	200	Terminal Ferroviaria (nº vías)	
Tráfico (TEUS año)	3750000	Nº Carriles Puerta	
% TRB	%	Sistema Informático	COSMOS
Huellas	23500 llenos / 4600 vacíos	Almacén m ²	
Conexiones Frigos	645		
Entrada-Salida (%Tráficos)			
Ratio TEU/Muelle	1364	Ratio Muelle/Grúa Holgura grúas	115
Ratio TEU/Ha	18750		

Profundidad de Explanada (m)	727		

Tabla 77 DEURGANCK (Left Bank) Terminal, HNN. Fuente: www.hnn.be .

Longitud de Muelle (m)	1180	Grúas	8
Profundidad de agua (m)	14,3	Maquinaria Explanada	60 SC + 1 RMG
Superficie (Ha)	72	Terminal Ferroviaria (n° vías)	
Tráfico (TEUS año)	1350000	N° Carriles Puerta	
% TRB	%	Sistema Informático	COSMOS
Huellas	8410 llenos / 2060 vacíos	Almacén m ²	
Conexiones Frigos	460		
Entrada-Salida (%Tráficos)			
Ratio TEU/Muelle	1144	Ratio Muelle/Grúa Holgura grúas	148
Ratio TEU/Ha	18750		
Profundidad de Explanada (m)	610		

Tabla 78 EUROPA Terminal, HNN. Fuente: www.hnn.be .

FELIXSTOWE

Longitud de Muelle (m)	2084	Grúas	21
Profundidad de agua (m)	15	Maquinaria Explanada	63 RTG + 42 TT + 150 PL + 4 RMG
Superficie (Ha)	109	Terminal Ferroviaria (nº vías)	7 x 500
Tráfico (TEUS año)	2800000	Nº Carriles Puerta	
% TRB	%	Sistema Informático	NAVIS
Ocupación TEUS (no huellas).	55000	Almacén m ²	
Conexiones Frigos	1157		
Entrada-Salida (%Tráficos)			
Ratio TEU/Muelle	1344	Ratio Muelle/Grúa Holgura grúas	99
Ratio TEU/Ha	25688		
Profundidad de Explanada (m)	523		
TT= tractoras; PL= plataformas			

Tabla B-79 TRINITY Terminal. Hutchison Port Holdings HPH. Fuente:
www.portoffelixtowe.co.uk .

Longitud de Muelle (m)	439	Grúas	4
Profundidad de agua (m)	11,9	Maquinaria Explanada	13 RTG + 2 RMG
Superficie (Ha)	30	Terminal Ferroviaria (nº vías)	SI
Tráfico (TEUS año)	450000	Nº Carriles Puerta	
% TRB	%	Sistema Informático	NAVIS
Ocupación TEUS (no huellas).	10000	Almacén m ²	
Conexiones Frigos	1157		
Entrada-Salida (%Tráficos)			

ANEXO B

Ratio TEU/Muelle	1025	Ratio Muelle/Grúa Holgura grúas	110
Ratio TEU/Ha	15000		
Profundidad de Explanada (m)	683		
TT= tractoras; PL= plataformas			

Tabla 80 LANDGUARD Terminal. HPH. Fuente: www.portoffelxtowe.co.uk .

ROTTERDAM

Longitud de Muelle (m)	3880	Grúas	23
Profundidad de agua (m)	16,6	Maquinaria Explanada	28 SC + 183 AGV +99 ASC + 4 RMG
Superficie (Ha)	313	Terminal Ferroviaria (nº vías)	18 Ha
Tráfico (TEUS estimado máximo año)	4500000	Nº Carriles Puerta	
% TRB	35%	Sistema Informático	NAVIS
Huellas		Almacén m ²	
Conexiones Frigos	2068		
Entrada-Salida (%Tráficos)	49% camión, 35% trb, 16% tren.		
Ratio TEU/Muelle	1160	Ratio Muelle/Grúa Holgura grúas	169
Ratio TEU/Ha	14377		
Profundidad de Explanada (m)	807		
TT= tractoras; PL= plataformas			

Tabla 81 ECT Delta Terminal, Europe Container Terminals, ECT. Fuente: www.ect.nl .

Longitud de Muelle (m)	1400	Grúas	11
Profundidad de agua (m)	14,15	Maquinaria Explanada	41 SC

Superficie (Ha)	67	Terminal Ferroviaria (n° vías)	SI
Tráfico (TEUS estimado máximo año)	800000	N° Carriles Puerta	
% TRB	34%	Sistema Informático	NAVIS
Huellas		Almacén m ²	
Conexiones Frigos	848		
Entrada-Salida (%Tráficos)	60% camión, 34% trb, 6% tren.		
Ratio TEU/Muelle	571	Ratio Muelle/Grúa Holgura grúas	127
Ratio TEU/Ha	11940		
Profundidad de Explanada (m)	479		

Tabla 82 ECT Home Terminal, ECT. Fuente: www.ect.nl .

Longitud de Muelle (m)	900	Grúas	11
Profundidad de agua (m)	14,4	Maquinaria Explanada	10 RMG + RS
Superficie (Ha)	60	Terminal Ferroviaria (n° vías)	SI
Tráfico (TEUS año)	1600000	N° Carriles Puerta	
% TRB		Sistema Informático	
Huellas		Almacén m ²	1800
Conexiones Frigos	400		
Entrada-Salida (%Tráficos)			
Ratio TEU/Muelle	1778	Ratio Muelle/Grúa Holgura grúas	82
Ratio TEU/Ha	26667		
Profundidad de Explanada (m)	667		

ANEXO B

TT= tractoras; PL= plataformas; RS=Reachstacker			
---	--	--	--

Tabla 83 ECT HANNO Terminal, ECT. Fuente: www.ect.nl .

AMSTERDAM

Longitud de Muelle 400 m indentado (m)	1012	Grúas	9
Profundidad de agua (m)	15	Maquinaria Explanada transtainers	39 SC
Superficie (Ha)	54	Terminal Ferroviaria (nº vías)	2 vías
Tráfico (TEUS año)	1000000	Nº Carriles Puerta	20
% TRB		Sistema Informático	NAVIS
huellas	433		
Conexiones Frigoríficos	433		
Entrada-Salida (%Tráficos)			
Ratio TEU/Muelle	988	Ratio Muelle/Grúa Holgura grúas	112
Ratio TEU/Ha	18519		
Profundidad de Explanada (m)	534		
TT= tractoras; PL= plataformas; RS=Reachstacker			

Tabla 84 CERES PARAGON. Fuente: www.ceresglobal.nl.

MALTA

Longitud de Muelle (m)	2426	Grúas	15
Profundidad de agua (m)	15,5	Maquinaria Explanada	29 RTG +2 RMG +52 TT +128 PL + 5 RS
Superficie (Ha)	55	Terminal Ferroviaria (nº vías)	NO
Tráfico (TEUS año)	1300000	Nº Carriles Puerta	
% TRB		Sistema Informático	NAVIS

Huellas	11907	Almacén m ²	
Conexiones Frigos	656		
Entrada-Salida (%Tráficos)			
Ratio TEU/Muelle	536	Ratio Muelle/Grúa Holgura grúas	162
Ratio TEU/Ha	23636		
Profundidad de Explanada (m)	227		
TT= tractoras; PL= plataformas; RS=Reachstacker			

Tabla 85 MARSAXLOKK Freeport Container Terminal. Malta Freeport Corporation. Fuente: www.freeport.com.mt .

GENOVA

Longitud de Muelle (m)	1400	Grúas	8
Profundidad de agua (m)	15	Maquinaria Explanada	19 RTG+ 3 RMG + 50 TT
Superficie (Ha)	100	Terminal Ferroviaria (nº vías)	7 x 700
Tráfico (TEUS año)	869000	Nº Carriles Puerta	
% TRB	%	Sistema Informático	
Huellas	12500	Almacén m ²	8000
Conexiones Frigos	600		
Entrada-Salida (%Tráficos)			
Ratio TEU/Muelle	621	Ratio Muelle/Grúa Holgura grúas	175
Ratio TEU/Ha	8690		
Profundidad de Explanada (m)	714		
TT= tractoras; PL= plataformas; RS=Reachstacker			

Tabla 86 VOLTRI Terminal Europe, PSA. Fuente: www.vte.it .

GIOIA TAURO

Longitud de Muelle (m)	3011	Grúas	18
Profundidad de agua (m)	15,5	Maquinaria Explanada	80 SC
Superficie (Ha)	120	Terminal Ferroviaria (n° vías)	6 x 700
Tráfico (TEUS año)	3080000	N° Carriles Puerta	
% TRB	ALTO	Sistema Informático	
Huellas		Almacén m ²	
Conexiones Frigos	300		
Entrada-Salida (%Tráficos)			
Ratio TEU/Muelle	1023	Ratio Muelle/Grúa Holgura grúas	167
Ratio TEU/Ha	25667		
Profundidad de Explanada (m)	399		
TT= tractoras; PL= plataformas; RS=Reachstacker			

Tabla 87 MEDCENTER CONTAINER TERMINAL, CONTSHIP Italia Group (EUROGATE). Fuente: www.eurogate.de .

PIREO

Longitud de Muelle (m)	2774	Grúas	14
Profundidad de agua (m)	16	Maquinaria Explanada	54 SC
Superficie (Ha)	90	Terminal Ferroviaria (n° vías)	NO
Tráfico (TEUS año)	1400000	N° Carriles Puerta	
% TRB	65%	Sistema Informático	NAVIS
Huellas		Almacén m ²	19200
Conexiones Frigos	288		
Entrada-Salida (%Tráficos)	65% TRB		
Ratio TEU/Muelle	505	Ratio Muelle/Grúa Holgura grúas	198

ANEXO B

Ratio TEU/Ha	15556		
Profundidad de Explanada (m)	324		
TT= tractoras; PL= plataformas; RS=Reachstacker			

Tabla 88 ELEFThERIOS VENIZELOS CONTAINER TERMINAL. PIRAEUS PORT AUTHORITY S. A. Fuente: www.olp.gr .

LE HAVRE

Longitud de Muelle (m)	1075	Grúas	5
Profundidad de agua (m)	14	Maquinaria Explanada	SC
Superficie (Ha)	40	Terminal Ferroviaria (n° vías)	3 x 500
Tráfico (TEUS año)	450000	N° Carriles Puerta	10
% TRB		Sistema Informático	
Huellas	7750	Almacén m ²	
Conexiones Frigos	288		
Entrada-Salida (%Tráficos)			
Ratio TEU/Muelle	419	Ratio Muelle/Grúa Holgura grúas	215
Ratio TEU/Ha	11250		
Profundidad de Explanada (m)	372		
TT= tractoras; PL= plataformas; RS=Reachstacker			

Tabla 89 TERMINAUX DE NORMANDIE, T-N. Fuente: www.t-n.fr .

MARSELLA

Longitud de Muelle (m)	1175	Grúas	6
Profundidad de agua (m)	14,5	Maquinaria Explanada	SC
Superficie (Ha)	56	Terminal Ferroviaria (n° vías)	800

Tráfico (TEUS año)	750000	Nº Carriles Puerta	
% TRB		Sistema Informático	
Huellas		Almacén m ²	
Conexiones Frigos	SI		
Entrada-Salida (%Tráficos)			
Ratio TEU/Muelle	638	Ratio Muelle/Grúa Holgura grúas	196
Ratio TEU/Ha	13393		
Profundidad de Explanada (m)	477		
TT= tractoras; PL= plataformas; RS=Reachstacker			

Tabla 90 FOS CONTAINER TERMINAL. Port Autonome de Marseille PAM.

Fuente: www.marseille-port.fr.

GOTEMBURGO

Longitud de Muelle (m)	1012	Grúas	8
Profundidad de agua (m)	12	Maquinaria Explanada transtainers	27 SC
Superficie (Ha)	60	Terminal Ferroviaria (nº vías)	SI
Tráfico (TEUS año)	666000	Nº Carriles Puerta	
% TRB		Sistema Informático	
huellas	433	Almacén	28900
Conexiones Frigoríficos	433		
Entrada-Salida (%Tráficos)			
Ratio TEU/Muelle	658	Ratio Muelle/Grúa Holgura grúas	127
Ratio TEU/Ha	11100		
Profundidad de Explanada (m)	593		
TT= tractoras; PL= plataformas; RS=Reachstacker			

Tabla 91 SKANDIA CONTAINER TERMINAL. www.portgot.se.

CARIBE

FREEPORT (GRAND BAHAMA)

Longitud de Muelle (m)	1033	Grúas	7
Profundidad de agua (m)	15,5	Maquinaria Explanada transtainers	30 SC
Superficie (Ha)	37	Terminal Ferroviaria (n° vías)	NO
Tráfico (TEUS año)	1058000	N° Carriles Puerta	
% TRB		Sistema Informático	
huellas		Almacén	
Conexiones Frigoríficos			
Entrada-Salida (%Tráficos)			
Ratio TEU/Muelle	1024	Ratio Muelle/Grúa Holgura grúas	148
Ratio TEU/Ha	28595		
Profundidad de Explanada (m)	358		
TT= tractoras; PL= plataformas; RS=Reachstacker			

Tabla 92 FREEPORT BAHAMAS. Fuente: www.hph.com.hk.

AUSTRALIA

SYDNEY

Longitud de Muelle (m)	1055	Grúas	6
Profundidad de agua (m)	15,2	Maquinaria Explanada transtainers	24 SC + 2 RMG
Superficie (Ha)	44,2	Terminal Ferroviaria (n° vías)	2 x 600
Tráfico (TEUS año)	730000	N° Carriles Puerta	
% TRB		Sistema Informático	
huellas	4881	Almacén	
Conexiones Frigoríficos	408		
Entrada-Salida (%Tráficos)			

ANEXO B

Ratio TEU/Muelle	692	Ratio Muelle/Grúa Holgura grúas	176
Ratio TEU/Ha	16516		
Profundidad de Explanada (m)	419		
TT= tractoras; PL= plataformas; RS=Reachstacker			

Tabla 93 PORT BOTANY. Fuente: www.patrick.com.au.

ESTADOS UNIDOS

HOUSTON

Longitud de Muelle (m)	1829	Grúas	12
Profundidad de agua (m)	12,19	Maquinaria Explanada	20 RTG + 2 RMG
Superficie (Ha)	101	Terminal Ferroviaria (nº vías)	4 x 823
Tráfico (TEUS año)	1100000	Nº Carriles Puerta	26
% TRB		Sistema Informático	
Huellas	23400	Almacén m ²	14400
Conexiones Frigos	532		
Entrada-Salida (%Tráficos)			
Ratio TEU/Muelle	601	Ratio Muelle/Grúa Holgura grúas	152
Ratio TEU/Ha	10891		
Profundidad de Explanada (m)	552		
TT= tractoras; PL= plataformas; RS=Reachstacker			

Tabla 94 BARBOURS CUT TERMINAL. Fuente: www.portofhouston.com .

NORFOLK

Longitud de Muelle (m)	1637	Grúas	10
Profundidad de agua (m)	15,2	Maquinaria Explanada	mixta RTG, sobre chasis y SC
Superficie (Ha)	134	Terminal Ferroviaria (nº vías)	si
Tráfico (TEUS año)	1650000	Nº Carriles Puerta	
% TRB		Sistema Informático	
Huellas	702 chasis + 8554 slots	Almacén m ²	
Conexiones Frigoríficos			
Entrada-Salida (%Tráficos)			
Ratio TEU/Muelle	1008	Ratio Muelle/Grúa Holgura grúas	164
Ratio TEU/Ha	12313		
Profundidad de Explanada (m)	819		
TT= tractoras; PL= plataformas; RS=Reachstacker			

Tabla 95 NORFOLK Internacional Terminals, VIRGINIA TERMINALS. Fuente: www.vit.org .

NEW YORK / NEW JERSEY

Longitud de Muelle (m)	1370	Grúas	11
Profundidad de agua (m)	13,5	Maquinaria Explanada	mixta 22 RTG + 126 TT y sobre chasis
Superficie (Ha)	108	Terminal Ferroviaria (nº vías)	no
Tráfico (TEUS año)		Nº Carriles Puerta	22
% TRB		Sistema Informático	NAVIS
Huellas	5817 chasis + 6969slots	Almacén m ²	
Conexiones Frigoríficos	628		13440
Entrada-Salida (%Tráficos)			

ANEXO B

Ratio TEU/Muelle	0	Ratio Muelle/Grúa Holgura grúas	125
Ratio TEU/Ha	0		
Profundidad de Explanada (m)	788		
TT= tractoras; PL= plataformas; RS=Reachstacker			

Tabla 96 APM Port Elizabeth, APM. Fuente: www.panynj.gov .

<www.apmterminals.com>

Longitud de Muelle (m)	3087	Grúas	13
Profundidad de agua (m)	15,2	Maquinaria Explanada	SC
Superficie (Ha)	180	Terminal Ferroviaria (nº vías)	si
Tráfico (TEUS año)		Nº Carriles Puerta	
% TRB		Sistema Informático	
Huellas		Almacén m ²	
Conexiones Frigoríficos	628		
Entrada-Salida (%Tráficos)			
Ratio TEU/Muelle	0	Ratio Muelle/Grúa Holgura grúas	237
Ratio TEU/Ha	0		
Profundidad de Explanada (m)	583		
TT= tractoras; PL= plataformas; RS=Reachstacker			

Tabla 97 MAHER TERMINAL New Jersey. Fuente: www.panynj.gov /

www.maherterminals.com>

ASIA

SINGAPUR

Longitud de Muelle (m)	12800	Grúas	143
Profundidad de agua (m)	16	Maquinaria Explanada transtainers	338
Superficie (Ha)	436	Terminal Ferroviaria (n° vías)	
Tráfico (TEUS año)	20400000	N° Carriles Puerta	
% TRB		Sistema Informático	
Huellas	66464	Almacén m ²	
Conexiones Frigoríficos	4900		
Entrada-Salida (%Tráficos)			
Ratio TEU/Muelle	1594	Ratio Muelle/Grúa Holgura grúas	90
Ratio TEU/Ha	46789		
Profundidad de Explanada (m)	341		
TT= tractoras; PL= plataformas; RS=Reachstacker			

Tabla 98 Capacidad estructural y parque de maquinaria de las 4 Terminales de PSA Singapur: TANJONG PAGAR, BRANI, KEPPEL y PASIR PANJANG.

Fuente: www.singaporepsa.com

HONGKONG

Longitud de Muelle (m)	8080	Grúas	82
Profundidad de agua (m)	15,5/16	Maquinaria Explanada transtainers	146 RTG + 64 RMG +12 OHBC +16 RS+ 38 FLT
Superficie (Ha)	206	Terminal Ferroviaria (n° vías)	
Tráfico (TEUS año)	9164000	N° Carriles Puerta	
% TRB		Sistema Informático	
Huellas		Almacén m ²	
Conexiones Frigoríficos			
Entrada-Salida (%Tráficos)			
Ratio TEU/Muelle	1134	Ratio Muelle/Grúa Holgura grúas	50

Ratio TEU/Ha	44485		
Profundidad de Explanada (m)	255		
TT= tractoras; PL= plataformas; RS=Reachstacker			

Tabla 99 Capacidad estructural y parque de maquinaria de las Terminales de HPH Hongkong y RIVER TRADE: HIT 4-6-7&9, COSCO-HIT y RIVER TRADE. Fuente: www.hph.com.hk / www.rttc.com.hk .

ANEXO C

CFG	35
ESTADOS	256
rows	4
n	3
k	12

Cfg (p)	CFG containers	1	2	3	4	5	6
1	12	3333					
1	11	3332					
2	10	3331	3322				
3	9	3330	3321	3222			
4	8	3320	3311	3221	2222		
4	7	3310	3220	3211	2221		
5	6	3300	3210	2220	2211	3111	
4	5	3200	3110	2210	2111		
4	4	3100	2200	2110	1111		
3	3	3000	2100	1110			
2	2	2000	1100				
1	1	1000					
1	0	0000					
35							

Tabla 101 Dimensión 3x4

ANEXO C

CFG	ESTADOS	rows	N	K	CFG containers	1	2	3	4	5	6	7
56	1024	5	3	15								
Cfg (p)												
1		15			33333							
1		14			33332							
2		13			33322	33331						
3		12			33330	33321	33222					
4		11			33320	33311	33221	32222				
5		10			33310	33220	33211	32221	22222			
6		9			33300	33210	33111	32220	32211	22221	22221	
6		8			33200	33110	32210	32111	22220	22211	22211	
6		7			33100	32200	32110	31111	22210	22110	22111	
6		6			33000	32100	31110	22200	22110	21110	21111	
5		5			32000	31100	22100	21110	11111			
4		4			31000	22000	21100	11110				
3		3			30000	21000	11100					
2		2			20000	11000						
1		1			10000							
1		0			00000							
56												

Tabla 102 Dimensión 3x5

ANEXO C

CFG	84										
ESTADOS	4096										
rows	6										
n	3	CFG	1	2	3	4	5	6	7	8	9
k	18	Containers (k)									
Cfg (p)											
1	18		333333								
1	17		333332								
2	16		333322	333331							
3	15		333330	333321	333222						
4	14		333320	333311	333221	332222					
5	13		333310	333220	333211	332221	322222				
7	12		333300	333210	333111	332220	332211	322221	222222		
7	11		333200	333110	332210	332111	322220	322211	222221		
8	10		333100	332200	332110	331111	322210	322111	222220	222211	
8	9		333000	332100	331110	322200	322110	321111	222210	222111	
8	8		332000	331100	322100	321110	311111	222200	222110	221111	
7	7		331000	322000	321100	311110	222100	221110	211111		
7	6		330000	321000	311100	222000	221100	211110	111111		
5	5		320000	311000	221000	211100	111110				
4	4		310000	220000	211000	111100					
3	3		300000	210000	111000						
2	2		200000	110000							
1	1		100000								
1	0		000000								

Tabla 103 Dimensión 3x6

ANEXO C

CFG	120											
ESTADOS	16384											
rows	7											
n	3	CFG	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
k	21	Containers (k)										
Cfg(p)												
1	21	3333333										
1	20	3333332										
2	19	3333322	3333331									
3	18	3333330	3333321	3333222								
4	17	3333320	3333311	3333221	3332222							
5	16	3333310	3333220	3333211	3332221	3322222						
7	15	3333300	3333210	3333111	3332220	3332211	3322221	3222222				
8	14	3333200	3333110	3332210	3332111	3322220	3322211	3222221	2222222			
9	13	3333100	3332200	3332110	3331111	3322210	3322111	3222220	3222211	2222221		
10	12	3333000	3332100	3331110	3322200	3322110	3321111	3222210	3222111	2222220	2222211	
10	11	3332000	3331100	3322100	3321110	3311111	3222200	3222110	3221111	2222210	2222111	
10	10	3331000	3322000	3321100	3311110	3222100	3221110	3211111	2222200	2222110	2221111	
10	9	3330000	3321000	3311100	3222000	3221100	3211110	3111111	2222100	2221110	2211111	
9	8	3320000	3311000	3221000	3211100	3111110	2222000	2221100	2211110	2111111		
8	7	3310000	3220000	3211000	3111100	2221000	2211100	2111110	1111111			
7	6	3300000	3210000	3111000	2220000	2211000	2111100	1111110				
5	5	3200000	3110000	2210000	2111000	1111100						
4	4	3100000	2200000	2110000	1111000							
3	3	3000000	2100000	1110000								
2	2	2000000	1100000									
1	1	1000000										
1	0	0000000										

120

Tabla 104 Dimensión 3x7

13 ANEXO D

REMOCIONES	PB (EST)	PASOS/sal	INDICE CONTENEDORES CONFIGURACIONES	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000			
				333	332	331	322	330	321	222	320	311	221	310	220	211	300	210	111	200	110	100	000	
1,33	1,000	9	333	1	2	2	1	2	1		1												1,000	
0,88	1,000	8	332			1	2	1	2		2												1,000	
	0,500	7	331					1	3		1	1		1									1,000	
0,79	0,500	7	322					2	3	1	1												1,000	
	0,409	6	330								3	1		1			1						1,000	
	0,545	6	321								3	1	2										1,000	
0,80	0,045	6	222								3		3										1,000	
	0,723	5	320											2	2	1							1,000	
	0,150	5	311											2	1	2							1,000	
0,72	0,127	5	221											3	2								1,000	
	0,449	4	310														1	2	1				1,000	
	0,334	4	220															4					1,000	
0,56	0,216	4	211															3	1				1,000	
	0,195	3	300																	1	2		1,000	
	0,654	3	210																	1	2		1,000	
0,41	0,151	3	111																		3		1,000	
	0,283	2	200																			2	1,000	
0,14	0,717	2	110																			2	1,000	
0,00	1,000	1	100																				1,000	
0,00	1,000	1	000																				1,000	
			SUCESOS	1,0	2,0	3,0	3,0	6,0	9,0	1,0	14,0	3,0	5,0	6,0	6,0	5,0	2,0	9,0	2,0	2,0	7,0	4,0	2,0	10,0
			PASOS/lleg	1,00	2,00	6,00		11,00			9,68			5,91			4,41		3,00		2,00	2,00		
			MOMENTO	1,00	2,00	3,00	3,00	4,50	6,00	0,50	7,00	1,45	1,23	2,66	1,98	1,28	0,86	2,89	0,67	0,85	2,15	2,00	2,00	
			PROBABILIDAD	1,000	1,000	0,500	0,500	0,409	0,545	0,045	0,723	0,150	0,127	0,449	0,334	0,216	0,195	0,654	0,151	0,283	0,717	1,000	1,000	
			R1	12	7	6	5	6	4	3	4	3	2	3	2	1	3	1	0	1	0	0	0	
			R2	1,33	0,88	0,43	0,36	0,41	0,36	0,02	0,58	0,09	0,05	0,34	0,17	0,05	0,19	0,22	0,00	0,14	0,00	0,00	0,00	
			R3	1,33	0,88	0,79			0,80			0,72			0,56			0,41		0,14		0,00	0,00	

Tabla 105 Pasos para el cálculo de probabilidades de estado y remociones para una dimensión 3x3

ANEXO D

				1,000	1,000	1,000		1,000			1,000				1,000				1,000				1,000			1,000			1,000	1,000	1,000								
INDICE				3,00	2,75	2,50	2,50	2,25	2,25	2,25	2,00	2,00	2,00	2,00	1,75	1,75	1,75	1,75	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,25	1,25	1,25	1,25	1,00	1,00	1,00	1,00	0,75	0,75	0,75	0,50	0,50	0,25	0,00	
CONTENEDORES				12	11	10	10	9	9	9	8	8	8	8	7	7	7	7	6	6	6	6	6	5	5	5	5	4	4	4	4	3	3	3	2	2	1	0	
REMOCIONES	PB (EST)	PASOS/sal	CONFIGURACIONES	3333	3332	3331	3322	3330	3321	3222	3320	3311	3221	2222	3310	3220	3211	2221	3300	3210	3111	2220	2211	3200	3110	2210	2111	3100	2200	2110	1111	3000	2100	1110	2000	1100	1000	0000	
1,50	1,000	12	3333	1	2	2	2	2	2	2	2																											1,000	
1,18	1,000	11	3332			1	1	1	2	2	2	1		1																									1,000
0,500	10	3331						1	3	1	1	1		1	1																								1,000
1,00	0,500	10	3322							2	2	2		2																									1,000
0,259	9	3330									3	1	2		1	1		1																					1,000
0,481	9	3321									1	1	3		1	1	1		1	1																			1,000
0,89	0,259	9	3222								3		3	1			2																						1,000
0,528	8	3320													1	3	1		1	1																			1,000
0,087	8	3311													2		4			2																			1,000
0,367	8	3221															3	3	1		1																		1,000
0,77	0,018	8	2222												4		4																						1,000
0,171	7	3310																	1	4	1																		1,000
0,574	7	3220																		3		2	1		1														1,000
0,216	7	3211																		4	1		2																1,000
0,70	0,039	7	2221																			4	3																1,000
0,112	6	3300																					4	2															1,000
0,561	6	3210																					2	1	2	1													1,000
0,045	6	3111																						3	1	2													1,000
0,152	6	2220																							6														1,000
0,58	0,131	6	2211																						4	2													1,000
0,391	5	3200																																					1,000
0,126	5	3110																																					1,000
0,357	5	2210																																					1,000
0,56	0,125	5	2111																																				1,000
0,207	4	3100																																					1,000
0,150	4	2200																																					1,000
0,593	4	2110																																					1,000
0,38	0,050	4	1111																																				1,000
0,052	3	3000																																					1,000
0,498	3	2100																																					1,000
0,22	0,450	3	1110																																				1,000
0,183	2	2000																																					1,000
0,09	0,817	2	1100																																				1,000
0,00	1,000	2	1000																																				1,000
0,00	1,000	1	0000																																				1,000
SUCESOS				1,0	2,0	3,0	3,0	4,0	9,0	5,0	14,0	3,0	12,0	1,0	6,0	18,0	9,0	5,0	3,0	16,0	2,0	6,0	6,0	9,0	6,0	13,0	5,0	4,0	2,0	12,0	2,0	1,0	7,0	8,0	2,0	7,0	5,0	2,0	
PASOS/lleg				1,00	2,00	6,00		13,50			14,28				11,36				8,59				7,27				5,00				4,00			3,00			3,00	2,00	
MOMENTO				1,00	2,00	3,00	3,00	3,50	6,50	3,50	7,54	1,24	5,24	0,26	1,94	6,52	2,46	0,44	0,96	4,82	0,39	1,30	1,12	2,84	0,92	2,60	0,91	1,03	0,75	2,97	0,25	0,21	1,99	1,80	0,55	2,45	3,00	2,00	
PB ESTACIONARIA				1,000	1,000	0,500	0,500	0,259	0,481	0,259	0,528	0,087	0,367	0,018	0,171	0,574	0,216	0,039	0,112	0,561	0,045	0,152	0,131	0,391	0,126	0,357	0,125	0,207	0,150	0,593	0,050	0,052	0,498	0,450	0,183	0,817	1,000	1,000	
R1				18	13	12	8	12	7	6	7	6	5	4	6	5	4	3	6	4	3	3	2	4	3	2	1	3	2	1	0	3	1	0	1	0	0	0	
R2				1,50	1,18	0,60	0,40	0,35	0,37	0,17	0,46	0,07	0,23	0,01	0,15	0,41	0,12	0,02	0,11	0,37	0,02	0,08	0,00	0,31	0,08	0,14	0,03	0,16	0,07	0,15	0,00	0,05	0,17	0,00	0,09	0,00	0,00	0,00	
R3				1,50	1,18	1,00		0,89			0,77				0,70				0,58				0,56				0,38				0,22			0,09			0,00	0,00	

Tabla 106 Probabilidades de estado y remociones para una dimensión 3x4

ANEXO D

		1,000	1,000	1,000		1,000	1,000				1,000	1,000						1,000															
REMOCIONES	PASOS/sal	INDICE	CONTENEDORES	CONFIGURACIONES	33333	33332	33322	33331	33330	33321	33222	33320	33311	33221	32222	33310	33220	33211	22222	33300	33210	33111	32220	32211	22221	33200	33110	32210	32111	22220	22211		
	1,80	1,000	15	33333	1	2	2	2	2	2	1	2	1		1																	1,000	
	1,36	1,000	14	33332			2	1	1	2	2	2	2		2																	1,000	
	0,571		13	33322						2	2	2	2	1		2							1										
	1,21	0,429	13	33331					1	2			2	2		2					2											1,000	
	0,253		12	33330								2			2	2				2	2					2							
	0,442		12	33321								1	1	3	1	1	1	1			1		1										
	1,09	0,305	12	33222										3	2								2									1,000	
	0,375		11	33320											1	3	1	2		1	1		1			1							
	0,080		11	33311											2		4	1			2							1					
	0,446		11	33221												3	2	3					1	1					1				
	0,92	0,100	11	32222												5		5	1													1,000	
	0,126		10	33310																1	4	2	1	2									
	0,483		10	33220																	4		4	2									
	0,155		10	33211																	3	1	2	4									
	0,231		10	32221																			5	3	2								
	0,79	0,005	10	22222																			5		5								1,000
	0,062		9	33300																						2	4	2	1				
	0,324		9	33210																						1	2	4	2				
	0,025		9	33111																							3	2	4				
	0,370		9	32220																								6		2	1		
	0,189		9	32211																								4	2	1	2		
	0,72	0,030	9	22221																										5	4		1,000
				SUCESOS	1,0	2,0	4,0	3,0	4,0	8,0	5,0	9,0	3,0	13,0	4,0	8,0	22,0	10,0	15,0	1,0	4,0	19,0	3,0	23,0	13,0	7,0	6,0	9,0	20,0	9,0	8,0	7,0	
				PASOS/leg	1,00	2,00	7,00		13,57			16,26				18,58						16,19							10,41				
				MOMENTO	1,00	2,00	4,00	3,00	3,43	6,00	4,14	6,09	1,30	7,24	1,62	2,34	8,97	2,88	4,29	0,10	1,01	5,24	0,41	5,99	3,06	0,49	1,33	0,97	4,97	1,19	1,08	0,87	
				PB ESTACIONARIA	1,000	1,000	0,571	0,429	0,253	0,442	0,305	0,375	0,080	0,446	0,100	0,126	0,483	0,155	0,231	0,005	0,062	0,324	0,025	0,370	0,189	0,030	0,128	0,093	0,478	0,114	0,104	0,083	
				R1	27	19	14	18	18	13	9	13	12	8	7	12	8	7	6	5	12	7	6	6	5	4	7	6	5	4	4	3	
				R2	1,80	1,36	0,62	0,59	0,38	0,48	0,23	0,44	0,09	0,32	0,06	0,15	0,39	0,11	0,14	0,00	0,08	0,25	0,02	0,25	0,10	0,01	0,11	0,07	0,30	0,06	0,05	0,03	
				R3	1,80	1,36	1,21		1,09			0,92				0,79							0,72							0,62			

Tabla 107 Probabilidades de estado y remociones para una dimensión 3x5 de 8 a 15 containers

