



Universidad  
de La Laguna

---

# Simulación de las tareas del patio de contenedores de una terminal portuaria.

*Simulation of the tasks in the storage yard of a port terminal.*

Adán Méndez Lemus

Dpto. Ingeniería Informática y de Sistemas

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Informática

Trabajo de Fin de Grado

---

La Laguna, 8 de septiembre de 2015



Dña. **Belén Melián Batista**, con N.I.F. 44.311.040-E, profesora Titular de Universidad adscrita al Departamento de Ingeniería Informática y de Sistemas de la Universidad de La Laguna, y **Christopher Expósito Izquierdo**, con N.I.F. 78.851.649-J, personal de Investigación del departamento de Ingeniería Informática y de Sistemas de la Universidad de La Laguna

## C E R T I F I C A N

Que la presente memoria titulada:

*“Simulación de las tareas del patio de contenedores de una terminal portuaria”*

ha sido realizada bajo su dirección por D. **Adán Méndez Lemus**, con N.I.F. 78.646.891-R.

Y para que así conste, en cumplimiento de la legislación vigente y a los efectos oportunos firman la presente en La Laguna a 8 de septiembre de 2015



## Agradecimientos

A mis familiares, especialmente a mis padres, Damián y Eulalia, y hermanos Héctor y Vicente, por escucharme mientras les aburría hablando de este trabajo.

A mis compañeros de universidad, que han sido un apoyo y ayuda para la realización de este proyecto, especialmente a Adriana, Guillermo, Tinguaro y Abraham.

A mi tío Jose Vicente.

A los que sólo están en mi corazón.



## Resumen

*Actualmente, debido a la creciente demanda del mercado, grandes cantidades de mercancías son transportadas por las vías de suministro mundiales en contenedores mediante trenes, camiones y buques portacontenedores. Los patios de contenedores son instalaciones logísticas ubicadas en las terminales de contenedores y dedicadas a almacenar mercancías. Es aquí donde ha sido ampliamente estudiado por la literatura científica el Blocks Relocation Problem. Este proyecto presenta una herramienta que permite la resolución y visualización de dicho problema y el estudio de distintas heurísticas.*

**Palabras clave:** Contenedores, patio de contenedores, Blocks Relocation Problem, heurísticas.



## Abstract

Nowadays, in the current society a lot of freights are transported in containers by trains, trucks, and container vessels within international supply chains. Port yards are logistic facilities in maritime container terminals devoted to store containers. In this scenario, Block Relocation Problem have been broadly studied in the scientific literature. We present in this project a software tool aimed at solving and visualize the solutions for these problem obtained by a set of optimization techniques.

**Keywords:** *Containers, port yard, Blocks Relocation Problem.*



# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Antecedentes . . . . .	1
1.2. Terminales portuarias . . . . .	2
1.3. Objetivos . . . . .	2
1.4. Alcance . . . . .	4
<b>2. Estado del arte</b>	<b>5</b>
2.1. TerminalStar . . . . .	5
2.2. Navis N4 . . . . .	5
2.3. Cosmos . . . . .	6
<b>3. Aplicación</b>	<b>9</b>
3.1. Barra de menú . . . . .	9
3.1.1. Menú File . . . . .	9
3.1.2. Menú Solve . . . . .	12
3.2. Barra de herramientas . . . . .	13
3.3. Área de visualización . . . . .	14
3.3.1. Vista de bahías . . . . .	14
3.3.2. Vista de bloques . . . . .	14
3.3.3. Vista de los movimientos . . . . .	15
<b>4. Blocks Relocation Problem</b>	<b>19</b>
4.1. Introducción . . . . .	19
4.2. Definición . . . . .	20
4.3. Heurísticas . . . . .	21
4.3.1. Aleatoria . . . . .	22
4.3.2. Pila más vacía . . . . .	22
4.3.3. Pila más llena . . . . .	22
4.3.4. Pila con contenedor de mayor prioridad . . . . .	22
4.3.5. Pila con contenedor de menor prioridad . . . . .	23
4.3.6. Pila con media de prioridad mayor . . . . .	23
4.3.7. Pila con media de prioridad menor . . . . .	23
4.4. Estructura y funcionamiento . . . . .	23

<b>5. Generación y almacenamiento de escenarios</b>	<b>29</b>
5.1. Estructuras de datos . . . . .	29
5.2. Almacenamiento de los escenarios . . . . .	30
<b>6. Resultados</b>	<b>33</b>
6.1. Pila aleatoria . . . . .	33
6.2. Pila más vacía . . . . .	34
6.3. Pila más llena . . . . .	34
6.4. Pila con contenedor de menor prioridad . . . . .	34
6.5. Pila con contenedor de mayor prioridad . . . . .	34
6.6. Pila con mayor media . . . . .	35
6.7. Pila con menor media . . . . .	35
6.8. Comparación de las distintas heurísticas . . . . .	35
<b>7. Conclusiones y trabajos futuros</b>	<b>45</b>
7.1. Optimización de las tareas de una terminal portuaria de contenedores . . .	45
7.2. La aplicación . . . . .	45
7.3. Resultados . . . . .	45
7.4. Alcance . . . . .	46
7.5. Tabajos futuros . . . . .	46
<b>8. Summary and Conclusions</b>	<b>47</b>
8.1. Optimización de las tareas de una terminal portuaria de contenedores . . .	47
8.2. La aplicación . . . . .	47
8.3. Resultados . . . . .	47
8.4. Scope . . . . .	48
<b>Bibliografía</b>	<b>49</b>

# Índice de figuras

1.1. Esquema de una terminal portuaria de contenedores . . . . .	3
1.2. Organización del patio de contenedores de una terminal portuaria . . . . .	3
3.1. Captura de la aplicación con la barra de menú (rojo), la barra de herramientas(verde) y el área de visualización (morado) . . . . .	10
3.2. Menú <i>File</i> de la aplicación, para la gestión de escenarios . . . . .	10
3.3. Ventana de selección de fichero para mostrar . . . . .	11
3.4. Ventana de selección de fichero para guardar el escenario mostrado . . . . .	11
3.5. Ventana para la selección de las dimensiones del escenario a generar . . . . .	12
3.6. Ventana para la selección de la heurística . . . . .	13
3.7. Ventana del reproductor . . . . .	13
3.8. Vista de las bahías proporcionada por la aplicación . . . . .	15
3.9. Vista de los bloques proporcionada por la aplicación . . . . .	15
3.10. Representación de un movimiento de extracción (en morado) en la vista de bahías (izquierda) y en la vista de bloques (abajo) . . . . .	16
3.11. Representación de un movimiento de recolocación (en morado) en la vista de bahías (izquierda) y en la vista de bloques (abajo) . . . . .	17
4.1. Representación de una bahía con 6 pilas de 4 alturas . . . . .	21
4.2. Movimientos de recolocación de contenedores con la heurística aleatoria . . . . .	25
4.3. Movimientos de recolocación de contenedores con la heurística de la pila más vacía . . . . .	25
4.4. Movimientos de recolocación de contenedores con la heurística de la pila más llena . . . . .	26
4.5. Movimientos de recolocación de contenedores con la heurística de la pila con contenedor de menor prioridad marcado con un asterisco(mayor tiempo de retirada) . . . . .	26
4.6. Diagrama de clases del BRP y las heurísticas . . . . .	27
5.1. Diagrama de clases del patio de contenedores . . . . .	30
5.2. Estructura de los ficheros XML que almacenan los escenarios . . . . .	31



# Índice de tablas

6.1. Tabla comparativa de los promedios de recolocación por cada extracción para las distintas heurísticas. En negrita, los mejores promedios . . . . .	36
6.2. Tabla de resultados con la heurística aleatoria . . . . .	37
6.3. Tabla de resultados con la heurística de la pila más baja . . . . .	38
6.4. Tabla de resultados con la heurística de la pila más alta . . . . .	39
6.5. Tabla de resultados con la heurística pila con el contenedor de menor prioridad	40
6.6. Tabla de resultados con la heurística de la pila con el contenedor de mayor prioridad . . . . .	41
6.7. Tabla de resultados con la heurística de la pila con menor prioridad media .	42
6.8. Tabla de resultados con la heurística de la pila con mayor prioridad media .	43



# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Antecedentes

El 26 de abril de 1956, el buque Ideal X partió del puerto de Newark, en Nueva Jersey, cargado con 58 contenedores de 35 pies. Cinco días después, arribó al puerto de Port Houston, en Texas, quedando en la historia como el primer transporte marítimo de contenedores [1]. Esta hazaña es mérito de McLean, un empresario de transporte por carretera con camiones, que tras calcular el coste por tonelada de transportar la carga en barcos, fundó la empresa SeaLand y convirtió un petrolero de la segunda guerra mundial en el buque Ideal X.

Los contenedores se fabrican bajo la norma ISO 668 [2], permitiendo que puedan ser usados a nivel global en cualquier país. Existen varias medidas y formas estándar, aunque los más usados, son los contenedores de 20 y 40 pies de largo, unos 6 y 12 metros, respectivamente. Para medir el tráfico de contenedores, se usa como unidad de medida el TEUs, que son unidades equivalentes a un contenedor de 20 pies, del inglés "*Twenty-foot Equivalent Unit*".

Durante las últimas décadas, las terminales portuarias han visto cómo ha crecido paulatinamente el tráfico de mercancías a nivel mundial mediante el uso de contenedores. Estas infraestructuras constituyen importantes fuentes de crecimiento económico para las regiones en las que se encuentran, así como elementos de vital importancia dentro de la cadena de suministro global. En este contexto, existe una gran competencia entre las terminales de contenedores dentro del mismo ámbito territorial que favorece el aumento de la productividad de las mismas.

Las estadísticas de Data World Bank de 2012 [3], colocan a España como el décimo país en cuanto al tráfico de contenedores con 14.714.701 TEUs, situado justo por detrás de Alemania, primer país europeo en dicha lista. Dentro de España, el puerto de La Luz, en Las Palmas de Gran Canaria, es el cuarto puerto en tráfico de contenedores, siendo los tres primeros Algeciras, Valencia y Barcelona.

Algunos indicadores destacables de la eficacia en la gestión de una terminal de contenedores son el tiempo de estancia de los buques portacontenedores en el puerto [4], o el número de contenedores manipulados al año. El manejo de los contenedores en el pa-

El funcionamiento de la terminal portuaria tiene una implicación directa en el nivel de servicio ofrecido. Los contenedores de exportación deben estar disponibles inmediatamente para no producir tiempos de espera en los medios de transporte terrestres, así como en los buques portacontenedores. La organización de los contenedores en las pilas del patio influye directamente en la productividad de la terminal. Recolocación de los contenedores o tener en cuenta qué contenedores tienen preferencia, permite aumentar la productividad, reduciendo el tiempo de espera de los medios que transportarán las mercancías. Estas tareas son complejas debido a que se han de controlar muchos aspectos variables, como la prioridad de retirada de los contenedores almacenados, que depende del *planning* de las compañías de transporte, o saber qué pila es mejor para colocar un contenedor minimizando el número de recolocaciones futuras, dificultando la planificación manual en cuanto a efectividad y tiempo.

## 1.2. Terminales portuarias

Las terminales portuarias juegan un papel fundamental en el transporte mundial de mercancías en contenedores, ya que son el punto de conexión entre los transportes marítimos y terrestres. En las terminales portuarias de contenedores, podemos distinguir tres zonas como podemos ver en la Figura 1.1:

1. Lado del mar, a la izquierda en la imagen, es dónde atracan los buques para ser cargados o descargados por las grúas de puerto.
2. Patio de contenedores. Se usa para el almacenamiento temporal de los contenedores, que serán transferidos a una de las otras zonas, haciendo que la gestión de ésta, sea de gran interés, y la más estudiada por la literatura científica.
3. Zona de transferencia a medios terrestres. Esta zona es el punto de conexión entre las cadenas de distribución terrestres, en las que los contenedores son transportados por camiones y trenes, y el patio de la terminal de contenedores.

Como se muestra en la Figura 1.2 el patio de contenedores consiste en un conjunto de bloques, formado por bahías que contienen un conjunto de pilas en las que diferenciamos distintas alturas. En el patio, los contenedores son manipulados por las grúas de patio (*yard cranes*), que se encargan de mover los contenedores dentro de los bloques. Los movimientos que puede realizar una de éstas grúas, van desde el apilamiento o adición de contenedores que llegan al bloque, hasta la extracción de los mismos, pasando por movimientos de recolocación, que consisten en cambiar un contenedor de la parte alta de una pila a otra, siempre dentro de un mismo bloque.

## 1.3. Objetivos

Se pretenden desarrollar algunas técnicas algorítmicas para la resolución del *Blocks Relocation Problem*, que se da en los patios de contenedores de las terminales portuarias, con el objeto de minimizar el número de movimientos necesarios para extraer los contenedores

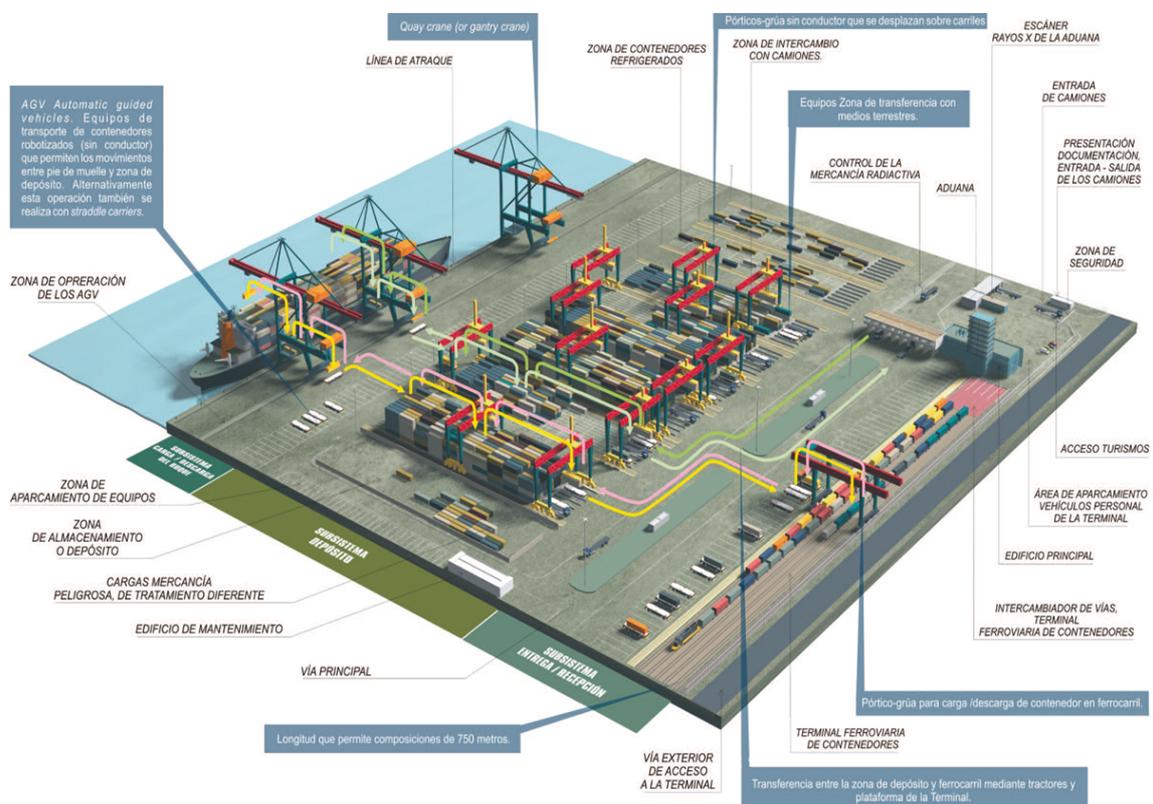


Figura 1.1: Esquema de una terminal portuaria de contenedores

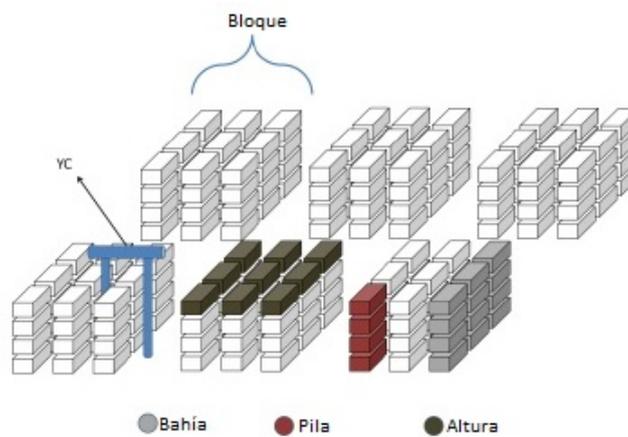


Figura 1.2: Organización del patio de contenedores de una terminal portuaria

de un bloque. Además, se realizará una interfaz gráfica de usuario, que permita la visualización de las soluciones a dicho problema y facilite el uso de las técnicas algorítmicas. Todo esto supondrá haber desarrollado un sistema integral para la gestión del patio de contenedores de una terminal portuaria.

## 1.4. Alcance

Se creará una aplicación para el estudio y visualización de los problemas que se dan en una terminal portuaria. Inicialmente, se desarrollarán las estructuras de datos que precisará la aplicación para almacenar la información relativa al patio de contenedores. Una vez realizado esto, procederemos a desarrollar la interfaz gráfica, que nos permitirá ver el estado del patio de contenedores, mostrando los bloques y las bahías, que contendrán las pilas de contenedores.

A continuación, se implementará un generador de patios de contenedores (*escenarios* de ahora en adelante) que mediante la parametrización del número de bloques, bahías, pilas, alturas y factor de llenado, permitirá la creación de un escenario aleatorio. Dicho generador será utilizado para crear un banco de pruebas, sobre el que se trabajará. Este consiste en una serie de escenarios con las dimensiones más comunes de los patios de contenedores, para conseguir una muestra que se asemeje lo más posible a la realidad.

El siguiente paso será implementar el problema de optimización que se estudia en este proyecto, el Blocks Relocation Problem. En dicho problema aparecen los movimientos de recolocación de contenedores, pasando de una pila de origen a una de destino. La determinación de la pila de destino influye directamente en la solución final, conllevando a que se realice mayor o menor número de movimientos. Este motivo nos lleva a desarrollar distintas heurísticas, que devuelvan el destino de un contenedor, para resolver el Blocks Relocation Problem. Se procederá a implementar, al menos, las siguientes heurísticas para determinar la pila destino: una pila aleatoria, la pila que más contenedores tenga, la pila que menos contenedores tenga y la pila que tenga el contenedor con menor prioridad.

Seguidamente, se implementará un módulo software para el manejo y reproducción de las soluciones generadas al aplicar los distintos algoritmos a los escenarios del banco de pruebas. Estas soluciones, además, se almacenarán en ficheros, para poder cargarlas y reproducirlas, y consistirán en el escenario, además del conjunto de movimientos necesarios para conseguir el estado final. Cargando las soluciones, podremos reproducirlas, y tener una referencia visual de cómo funcionan los algoritmos. El reproductor permitirá transitar por los distintos instantes de tiempo, permitiendo en todo momento la visualización del instante anterior y el siguiente. En cada instante, se mostrará una lista con los movimientos realizados, además de mostrar las bahías en las que se producen movimientos, identificando los mismos con un código de colores.

## Capítulo 2

# Estado del arte

En la actualidad existen diversas tecnologías de la información y la comunicación (TIC de ahora en adelante) que permiten la gestión y monitorización de las terminales portuarias. Sin embargo, todas estas soluciones son, por lo general, costosas, y no todas las terminales portuarias pueden afrontar sus costes. A continuación, analizaremos una selección de las más destacadas en la actualidad.

### 2.1. TerminalStar

TerminalStar se presenta como una solución tecnológica para controlar y optimizar la utilización de los recursos y el conjunto de las terminales portuarias, gracias a diversos algoritmos optimizados. Realiza la planificación y el control de las operaciones dinámicamente y en tiempo real. [5]

Este software intenta minimizar los movimientos de recolocación para extraer un contenedor del patio. Para conseguir este fin, determina la localización óptima de cada contenedor entrante de dos posibles maneras, apilando los contenedores según el destino, o bien, colocando los contenedores según el tiempo estimado de retirada. Este último método consiste en que los contenedores que tengan el tiempo estimado de retirada más próximo, se encuentren por encima de los que el tiempo de retirada sea mas lejano.

En los patios automatizados, esta solución TIC, recoloca los contenedores para aprovechar así el tiempo en que los equipamientos están sin usar, permitiendo re-optimizar el área de almacenamiento y agilizando las tareas posteriores de manejo de contenedores.

Además de las tareas del patio de contenedores, este software permite planificar las zonas de atraque de los buques y la optimización del transporte desde los bloques los medios terrestres.

### 2.2. Navis N4

Navis N4 es una plataforma tecnológica sofisticada y moderna que optimiza la eficiencia y potencia el movimiento inteligente de bienes a través de las terminales portuarias alrededor del mundo. El objetivo de esta solución es reducir todo lo posible los costes. La tecnología

de Navis N4 es mantenible y adaptable, permitiendo a los consumidores la flexibilidad y escalabilidad que necesitan, permitiendo con una única instancia la gestión de múltiples terminales en distintas localizaciones geográficas.

Navis se compone de los siguiente 6 módulos:

#### **Navis Prime Route**

Este módulo permite la optimización y planificación en tiempo real de los transportes internos de las terminales de contenedores, consiguiendo minimizar el número de dichos transportes.

#### **Navis Vessel Autostow**

Vessel Autostow planifica y selecciona el mejor atraque para el buque según las especificaciones de la terminal y los contenedores, minimizando el número de elevaciones por contenedor.

#### **Navis Rail Autostow**

Al igual que el módulo anterior, Rail Autostow permite a los operadores asignar los destinos de los trenes para, teniendo en cuenta las restricciones de la terminal y los contenedores, minimizar el número de elevaciones de contenedores.

#### **Navis Monitor**

Este módulo permite la monitorización de las tareas de las terminales portuarias en tiempo real, mostrando los indicadores clave de rendimiento. Mediante el seguimiento de los procesos operativos en tiempo real, los operadores aumentan la visibilidad operativa, mantienen las expectativas de rendimiento, mejoran la comunicación y aumenta la cooperación.

#### **Navis Analytics**

Es el módulo de información del sistema operativo Navis, ayudando a los ejecutivos de las terminales portuarias a mejorar continuamente gracias a los informes de calidad, permitiendo a los operadores y gerentes tomar decisiones estratégicas rápidamente.

#### **Navis Expert Decking**

El módulo Expert Decking automatiza la planificación del patio, distribuyendo los contenedores a través del patio basándose en unas reglas de negocio predefinidas. Es capaz de calcular, en tiempo real, las localizaciones adecuadas para los contenedores.

### **2.3. Cosmos**

Cosmos Container Terminal System es una solución TIC compuesta por múltiples módulos para coordinar las operaciones logísticas de las terminales de contenedores. Dicho sistema ayuda al planeamiento, seguimiento y control del flujo de contenedores en las terminales, desde que llegan hasta que parten, a la vez que monitorizan todas las tareas, para que los gestores puedan controlar el rendimiento.

Los módulos que componen el sistema son los siguientes:

### **Ships**

Ships es el software para la planificación de los buques. Esta aplicación permite la planificación automatizada para optimizar la carga y descarga de los buques buscando la reducción del tiempo que el barco está atracado. Además de las tareas de planificación, permite imprimir informes de dichos planes.

### **Space**

Este módulo permite aumentar la capacidad del patio de contenedores, simplificando considerablemente el plan de actuación en la terminal, y reduce drásticamente la planificación manual. Space automatiza la planificación de las tareas del patio hasta un 25 % con respecto a la planificación manual, haciendo uso de los parámetros que se puede especificar. Este módulo dispone de una interfaz gráfica y además de la planificación, permite el control del equipamiento para el manejo de contenedores.

### **Trafic**

Este módulo se encarga de la automatización para el control de los problemas de las terminales y el uso eficiente del equipamiento de la misma. Para ello, optimiza las asignaciones de los movimientos de los contenedores conociendo los transportes disponibles. Al igual que otros módulos, Trafic permite la generación de informes.

### **ePortal**

Este módulo es un portal online para la gestión de los pedidos y la consulta de la información crítica de los buques y los contenedores por parte de los clientes. Esto contribuye en gran medida a reducir los trabajos de carga y descarga y disminuir los costes y los tiempos que pasan los buques atracados. Los datos se pueden consultar mediante cuentas personales que se crearán para dicho fin.

### **CTCS**

EL módulo CTCS, de las siglas en inglés de Sistema de Control de Terminales Portuarias, permite la supervisión de todas las actividades de la terminal. La aplicación CTCS da soporte y controla las actividades administrativas y operacionales de la terminal, además de generar informes de dichas actividades.

### **AGS**

Automatic Gate System es el módulo encargado del control de las puertas de entrada y salida de la mercancía. Es la interfaz que une el sistema operativo de las puertas y el sistema operativo de la terminal, estableciendo la comunicación entre ellas.

### **Corebis**

Corebis se encarga de la contabilidad y la generación de facturas haciendo uso de los datos almacenados en el módulo CTCS. Automatiza los procedimientos para generar las facturas cuando el trabajo en un buque ha sido completado, permitiendo su modificación antes de imprimirlas.

### **Signal**

Este módulo se encarga de la transmisión y recepción de los mensajes de intercam-

bio de datos electrónicos (EDI) de manera automatizada. Permite mantener a los usuarios informados automáticamente.

**TOM**

Terminal Operation Monitor, es el módulo para la monitorización en tiempo real de las tareas de la terminal. Monitoriza la productividad de los Buques, las grúas de puerto, los camiones y el patio de contenedores, además de generar alertas cuando las operaciones se pasan de los márgenes establecidos por lo operadores.

**BAS**

Berth Allocation System, o Sistema de asignación de atraques, es el módulo encargado de seleccionar el mejor atraque para los buques, basándose en criterios definidos por los gestores, como por ejemplo la hora de llegada o salida. Se ayuda de una interfaz gráfica que facilita la visualización de los planes de atraque.

## Capítulo 3

# Aplicación

Este capítulo versa sobre la aplicación desarrollada para la visualización y el estudio del Blocks Relocation Problem, gestionando los escenarios, representándolos, y estudiando las soluciones obtenidas haciendo uso de distintas heurísticas para la resolución del citado problema de optimización.

La aplicación se compone de varios módulos dependientes. El primer módulo, se encarga de la gestión de los escenarios y su generación, que se explica en el Capítulo 5. Otro módulo, se encarga de la visualización de los escenarios y sus soluciones, que contiene un módulo para la reproducción de dichas soluciones.

A continuación, se detallan las distintas partes de la interfaz gráfica de usuario, GUI de ahora en adelante, en la que podemos distinguir tres elementos principales. Una barra de menú, una barra de herramientas, y el área de visualización del estado de los escenarios, como se detalla en la captura de la Figura 3.1. Inicialmente, debemos tener un escenario para mostrar o resolver, por lo que únicamente tenemos habilitado el menú *File* de la barra de menú.

### 3.1. Barra de menú

La barra de menú, contiene dos grupos de menús. El primero, *File*, nos permite realizar las tareas de apertura, salvado y creación de escenarios mediante las opciones *Open*, *Save* y *Generate* respectivamente, y el segundo, *Solve*, nos permite resolver el Blocks Relocation Problem para el escenario abierto.

#### 3.1.1. Menú File

La Figura 3.2 nos muestra las distintas opciones de dicho menú, que se detalla en los siguientes párrafos.

##### **Abrir**

Haciendo click en el menú *File Open*, aparece una ventana para la selección del fichero XML, como la que muestra la Figura 3.3, que deseamos abrir. Si el contenido del fichero se corresponde con la estructura de los ficheros que almacenan los patios,



Figura 3.1: Captura de la aplicación con la barra de menú (rojo), la barra de herramientas(verde) y el área de visualización (morado)

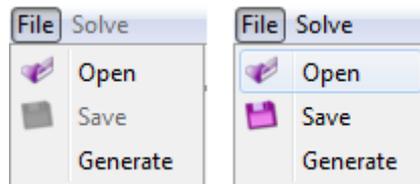


Figura 3.2: Menú *File* de la aplicación, para la gestión de escenarios

la aplicación mostrará el escenario, activando los menús que podamos ejecutar. En caso contrario, mostrará una ventana con la descripción del error producido.

### Guardar un escenario

El escenario mostrado se almacena en un fichero XML mediante el menú *File Save*, que abrirá una ventana para la creación del fichero en la carpeta deseada, como la mostrada en la Figura 3.4. Si no se define la extensión *.xml* en el nombre del fichero, ésta se autocompletará automáticamente.

### Generar un escenario

Para generar un escenario, abriremos el menú *File Generate*, introduciendo los parámetros para la creación del mismo mediante los campos de texto, o los deslizadores mostrados en la Figura 3.5. Los valores introducidos están limitados a los

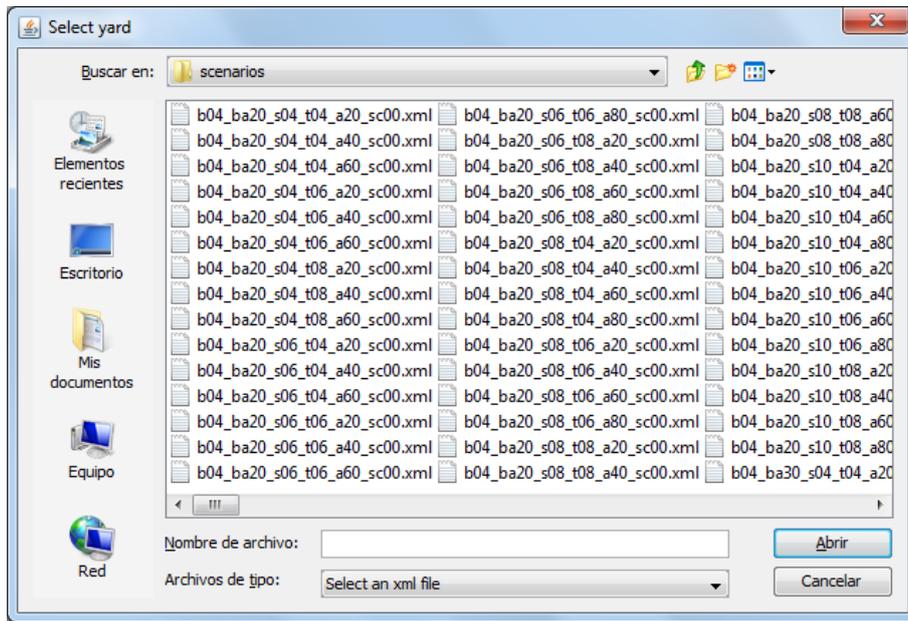


Figura 3.3: Ventana de selección de fichero para mostrar

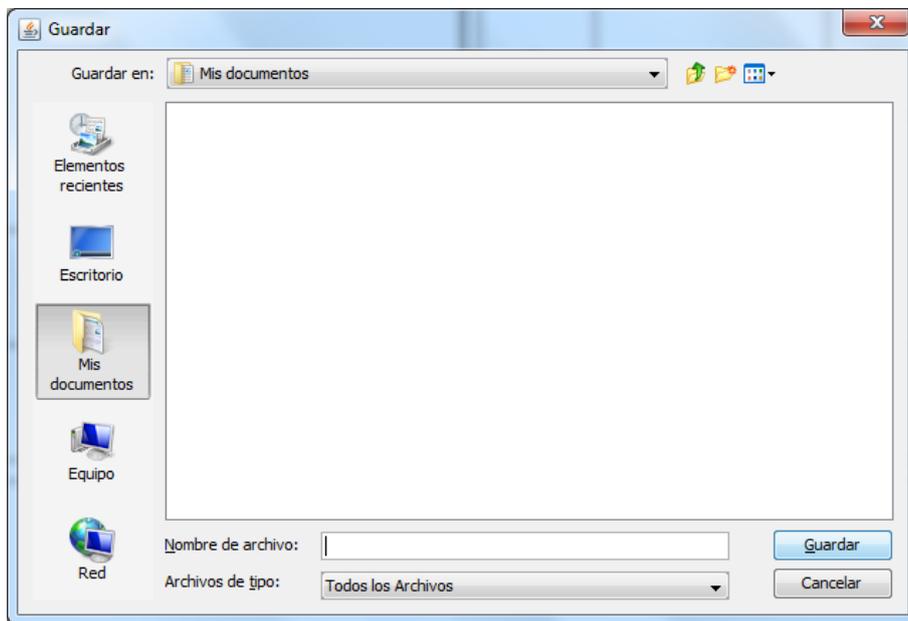


Figura 3.4: Ventana de selección de fichero para guardar el escenario mostrado

rangos mostrados por los deslizadores.

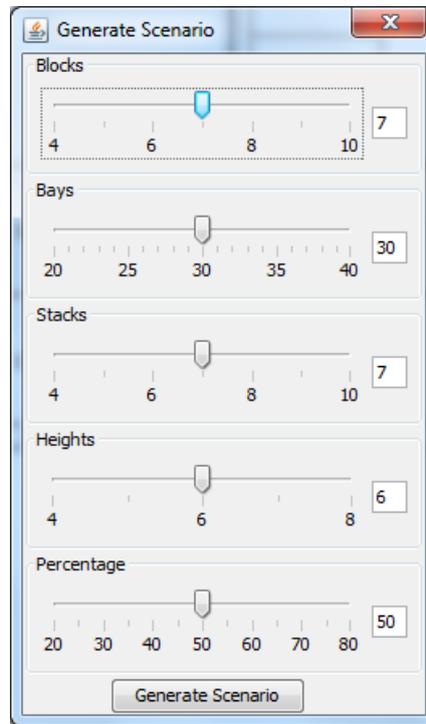


Figura 3.5: Ventana para la selección de las dimensiones del escenario a generar

### 3.1.2. Menú Solve

En el menú de resolver, podemos buscar la solución al Blocks Relocation Problem, seleccionando una heurística de las disponibles. Para ello, abrimos el menú *Solve* y seleccionamos la heurística de la lista mostrada en la ventana que se abre, tal como se muestra en la Figura 3.6. Si aceptamos presionando el botón *Solve*, se ejecutará el algoritmo en segundo plano, y una vez terminado, se abrirá la ventana de reproducción de las soluciones.

Al hallar una solución para el problema, se abre un reproductor como el de la Figura 3.7, además de activarse los botones de la barra de herramientas. Este reproductor, contiene un botón para transitar al instante de tiempo anterior, otro para reproducir, y otro para transitar al instante de tiempo siguiente. Debajo de los botones, se muestra el instante de tiempo en el que estamos, y continuación, una lista con los movimientos para dicho instante. En esta lista, se muestra para cada movimiento, el instante de tiempo en el que se realiza, seguido por dos puntos, y el origen y destino del mismo. Tanto el origen como el destino, muestran el bloque, la bahía, la pila y la altura del mismo. Si los valores de alguno de los anteriores son -1, significa que el movimiento es de extracción.

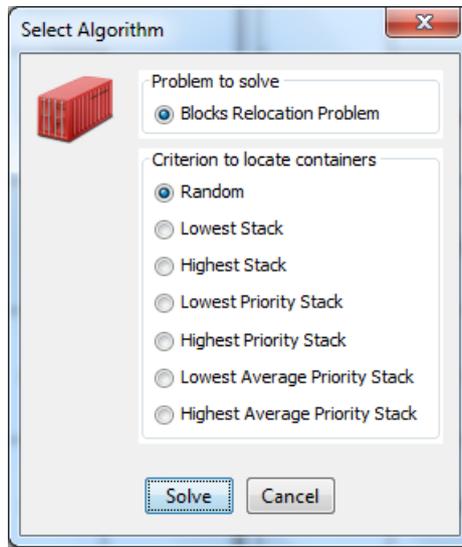


Figura 3.6: Ventana para la selección de la heurística

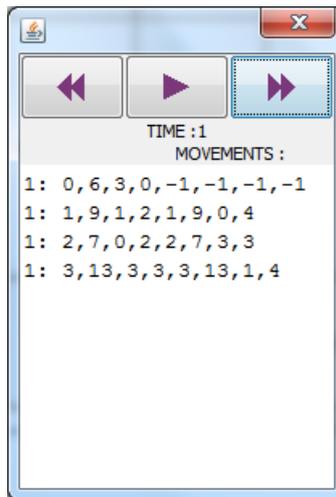


Figura 3.7: Ventana del reproductor

### 3.2. Barra de herramientas

La zona delimitada en verde que muestra la Figura 3.1, es una barra de herramientas. En ella, se disponen los botones del reproductor que, como se explica en la Subsección 3.1.2, nos permiten ver los distintos movimientos de la solución mostrada. Siguiendo a los botones, cuando hallemos una solución a un problema, se mostrará la heurística usada y el número de recolocaciones necesitadas.

### 3.3. Área de visualización

Existe un gran abanico de posibilidades para visualizar la información de los escenarios, ya sea en dos o tres dimensiones. Para este proyecto, se ha decidido crear vistas en dos dimensiones para la representación de los escenarios y los movimientos de contenedores dentro del mismo, usando las librerías de *awt* y *swing* de Java.

En este caso hemos decidido crear dos vistas, que nos permitirán ver los movimientos desde distintas perspectivas, ambas en dos dimensiones. En ellas, los contenedores se representan como rectángulos, mostrando en su interior la prioridad, que hemos decidido que sea el tiempo de retirada estimado del mismo, como podemos ver en las Figuras 3.8 y 3.9.

#### 3.3.1. Vista de bahías

Esta vista muestra la composición de las bahías que forman cada uno de los bloques, creando un visualizador de bahías para cada bloque, que la Figura 3.8 muestra delimitados en rojo. Cada uno de estos visualizadores contiene en la parte superior, con fondo gris claro, dos etiquetas que informan del bloque al que pertenece, y la bahía que se muestra. A ambos lados de estas etiquetas, marcados en morado en la Figura 3.8 para el bloque 0, se disponen dos botones: el primero, situado a la izquierda de las etiquetas, se usa para mostrar la bahía anterior; y el segundo, a la derecha de las etiquetas, nos permite visualizar la siguiente bahía. El resto de espacio de cada visualizador, está formado por la imagen de la bahía. Para representarla, se han dispuesto los contenedores en un eje de coordenadas. En el eje de las abscisa, se muestra el índice de las pilas de la bahía, mientras que el eje de ordenadas, se representan las distintas alturas de la bahía. Los contenedores se representan mediante rectángulos con el tiempo de retirada estimado en el interior, siendo la referencia a su posición, los números de bloque y bahía que muestran las etiquetas de la zona gris, y el número de pila y altura que se muestra en los ejes. En la Figura 3.8, se puede ver en el *bloque 0, bahía 0, pila 4 y altura 1*, un contenedor con *tiempo de retirada 74*, denotando la posición del contenedor de manera absoluta como  $(0,0,4,1)$ .

#### 3.3.2. Vista de bloques

Ésta vista, divide el espacio del área de visualización en el número de bloques que forman el escenario a mostrar. Cada una de estas divisiones, marcadas en rojo en la figura 3.9, muestra una vista aérea de cada bloque, con una zona para la etiqueta del bloque que se representa a la izquierda, y el resto para dibujar los contenedores. La zona para la etiqueta, que tiene un fondo gris claro, muestra el número de bloque con el texto girado 90 grados. El área de dibujo, muestra el tiempo de retirada de los contenedores que se encuentran en lo alto de cada una de las pilas, mostrando un guión si la pila está vacía, como se puede observar en la Figura 3.9 marcado en morado. En el eje horizontal, en la parte superior, se indican los números de bahías y en el eje vertical, a la izquierda, se denotan los números de las pilas. La pila vacía marcada en morado está en el bloque 0, en la bahía 13, y la pila 1.

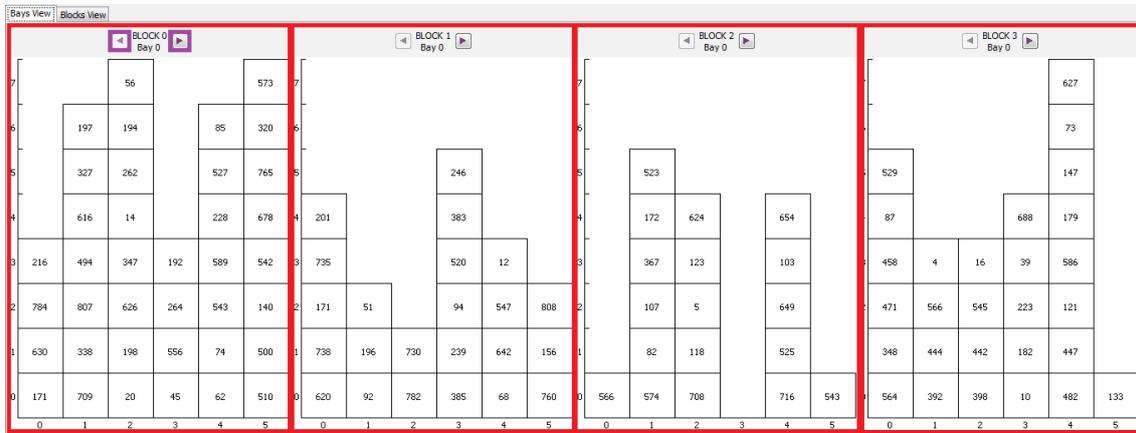


Figura 3.8: Vista de las bahías proporcionada por la aplicación

En la parte alta de la pila 4 de la bahía 0 del bloque 0, se halla un contenedor con tiempo de retirada 85 como muestra la Figura 3.9, si nos fijamos en la Figura 3.8, podemos comprobar que la altura para dicho contenedor es 6, denotando la posición de este contenedor como  $(0,0,4,6)$ .

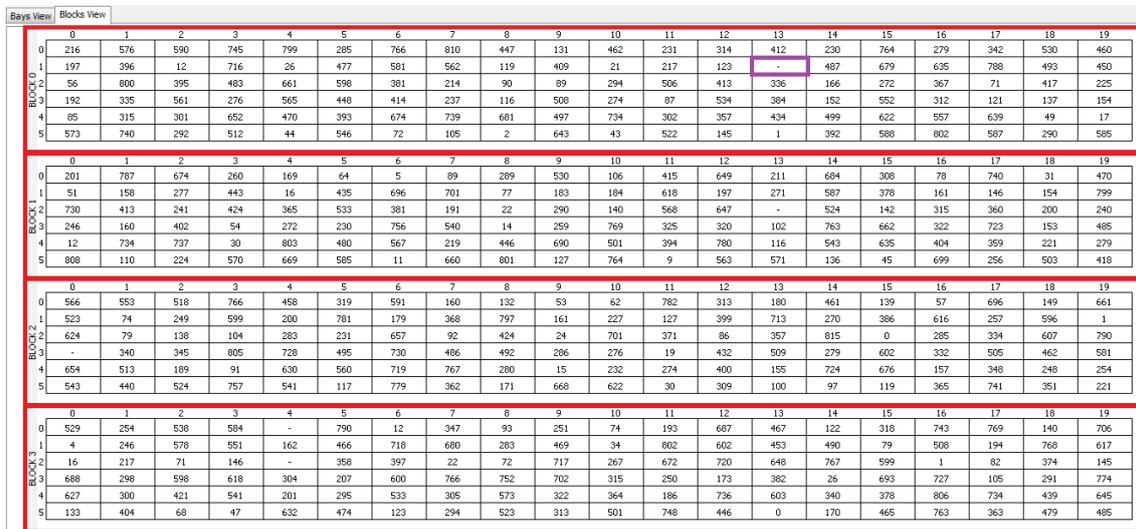


Figura 3.9: Vista de los bloques proporcionada por la aplicación

### 3.3.3. Vista de los movimientos

Dado que se pueden realizar movimientos de extracción y de recolocación, las vistas difieren ligeramente, sin embargo, el origen se representa en ambos casos con un rectángulo

rojo, y el destino con un rectángulo verde. Si el movimiento es una extracción, se representa únicamente el origen del contenedor extraído, como muestra la Figura 3.10, y si el movimiento es una recolocación, se representa el origen y el destino, como se puede observar en la Figura 3.11.

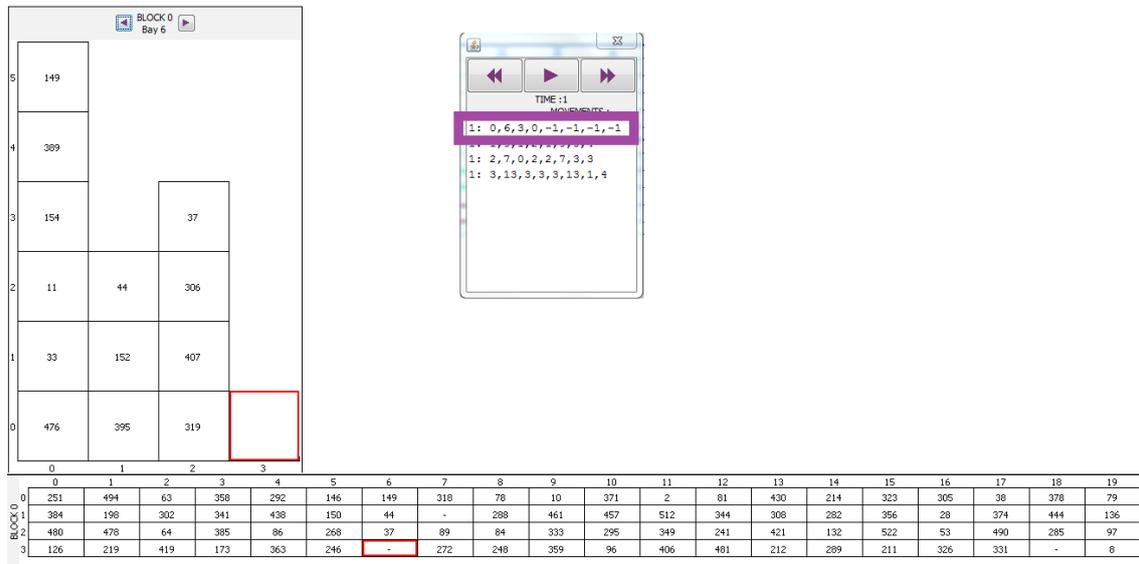


Figura 3.10: Representación de un movimiento de extracción (en morado) en la vista de bahías (izquierda) y en la vista de bloques (abajo)

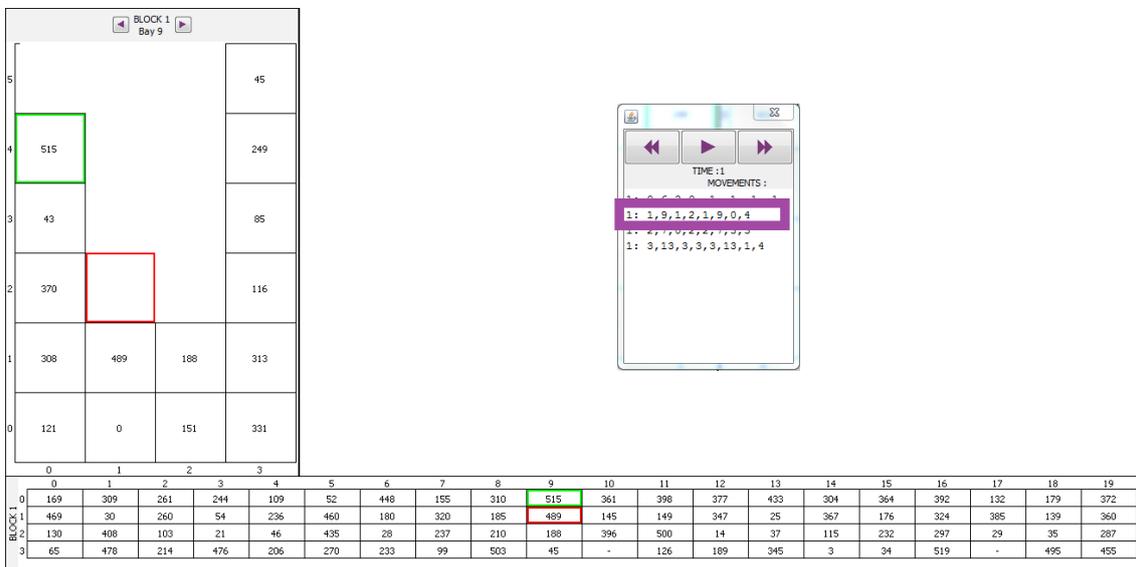


Figura 3.11: Representación de un movimiento de recolocación (en morado) en la vista de bahías (izquierda) y en la vista de bloques (abajo)



## Capítulo 4

# Blocks Relocation Problem

### 4.1. Introducción

Las terminales mueven una gran cantidad de contenedores, que permiten a los países importar y exportar mercancías. Para estas tareas, las terminales deben ser capaces de manejar los contenedores, teniendo en cuenta factores como minimizar los tiempos de espera de los barcos portacontenedores, o minimizar el número de movimientos de contenedores.

Un contenedor es considerado de exportación, cuando va desde el lado de transportes terrestres al lado del mar, donde son cargados en buques, mientras que se considera de importación, si va en sentido contrario, desde el buque a los transportes terrestres. Además, debemos tener en cuenta, que los contenedores también son descargados de un buque y almacenados en el patio para, más tarde, cargarlos de nuevo en otro barco. Todo esto genera un gran tráfico de contenedores en el patio, por lo que esta zona, es el cuello de botella del flujo de contenedores en las terminales portuarias [6]. Dado que la colocación final al descargar un buque, depende del orden en que se descargue el mismo, no siempre quedan los contenedores ordenados por prioridad. Con las operaciones de carga ocurre exactamente lo mismo, y además, las prioridades pueden variar según la planificación de las distintas compañías de transporte marítimo.

Para resolver este problema, existen dos aproximaciones. La primera es recolocar los contenedores en el patio, para que los de mayor prioridad queden siempre sobre los de menor prioridad en todas las pilas. Esto se conoce como Pre-marshalling Problem, que se realiza durante los tiempos de espera entre carga y descarga de los transportes, por lo que no hay contenedores que entran, ni contenedores que se retiran del patio. Pero las condiciones del patio pueden hacer que no existan estos tiempos, sean demasiado cortos, o que la configuración de la misma sea fija, introduciendo la otra aproximación, que consiste en la retirada de contenedores minimizando el número de movimientos totales realizados para dicha tarea. A esta aproximación, se le conoce como el Blocks Relocation Problem, BRP de ahora en adelante.

## 4.2. Definición

Como hemos visto con anterioridad en la Sección 1.2, los patios de contenedores consisten en un conjunto de bloques, formados por bahías que se organizan en pilas de una determinada altura. La literatura resuelve el BRP para una bahía, en cambio, este proyecto aplica la definición del problema para el conjunto de los bloques. De esta manera, definimos el BRP como, *dado un bloque de contenedores con  $B$  bahías, compuestas por  $P$  pilas de  $H$  alturas, se define una secuencia con el menor número de movimientos posibles, para extraer los contenedores en orden, desde el de mayor prioridad al de menor. Este proyecto cuenta con las siguientes restricciones:*

- Todos los bloques de contenedores están formados por el mismo número de bahías.
- Todas las bahías contienen el mismo número de pilas.
- Todas las pilas tiene el mismo número de alturas.
- Todos los contenedores tienen las mismas dimensiones.
- Se conoce de antemano la disposición de los contenedores y la prioridad.
- Únicamente se pueden mover los contenedores que estén en lo alto de las pilas.
- Los contenedores se pueden mover a lo alto de una pila, que es el suelo si la pila está vacía.
- Disponemos de una grúa para cada bloque, por lo que sólo se puede realizar un movimiento en cada instante de tiempo por bloque.
- En un bloque, no pueden haber dos contenedores con el mismo tiempo estimado de retirada.
- Cada movimiento conlleva un instante de tiempo.
- Los contenedores no pueden ser retirados hasta que llegue su instante de tiempo.

La Figura 4.1 muestra una bahía con 6 pilas, 4 alturas y rectángulos como contenedores con la prioridad, tiempo estimado de retirada, en su interior. Resolver el BRP, consistirá pues, en determinar la secuencia de movimientos que permita retirar todos los contenedores de la bahía, en orden de prioridad, realizando el menor número de movimientos posibles.

La secuencia de contenedores retirados, comenzará con el contenedor de prioridad 1, seguido del de prioridad 2, y así sucesivamente hasta retirar el contenedor con prioridad 17. En la Figura 4.1 se puede apreciar que la extracción de los contenedores 1, 2 y 3 es una tarea trivial, que únicamente consiste en elevarlos y eliminarlos de la bahía. Sin embargo, para la extracción del contenedor con prioridad 4, necesitaremos recolocar los contenedores 5 y 8 en otras pilas, antes de extraer el contenedor con prioridad 4. Si movemos, por ejemplo, el contenedor 5 a la pila 1, y posteriormente recolocamos el contenedor 8 a la misma

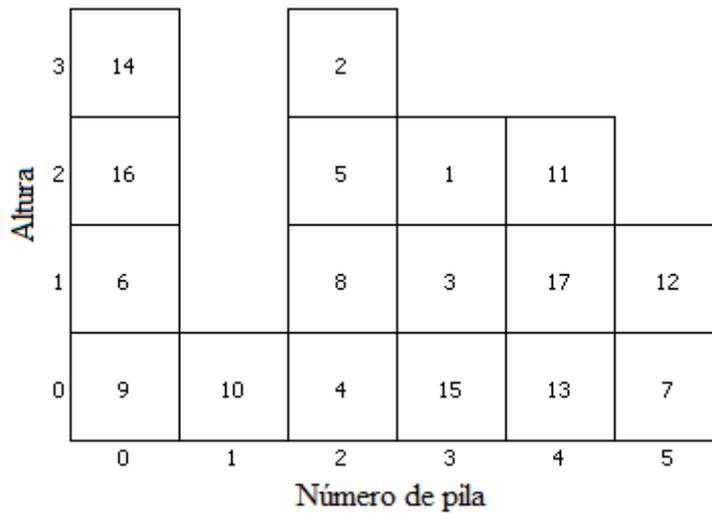


Figura 4.1: Representación de una bahía con 6 pilas de 4 alturas

pila, tendremos que realizar la recolocación del contenedor con prioridad 8 por segunda vez, para poder extraer el contenedor con prioridad 5, aumentando así el número total de movimientos.

Para resolver este problema minimizando el número de movimientos, se definen distintas heurísticas, que se estudian en la Sección 4.3.

### 4.3. Heurísticas

Dado que el factor de mayor repercusión para la productividad del patio de contenedores para una terminal portuaria son los movimientos de recolocación [7], la literatura estudia distintas heurísticas, que permiten definir una buena estrategia, para determinar la pila destino para dichos movimientos. Es el caso de *Forster y Bortfeldt (2010)* [8], que proponen un procedimiento basado en un árbol de búsqueda, empleando secuencias de movimientos para la ramificación, en lugar de usar movimientos individuales. *Caserta y Voss (2011)* [9], proponen un método híbrido entre la programación matemática y técnicas heurísticas, denominado Corridor Method. Más recientemente, *Jovanovic y Voss (2014)* [10], proponen una heurística denominada “Chain Heuristic”, que determina hasta dos movimientos en cada iteración.

Las distintas heurísticas que se presentan a continuación, proporcionan distintos métodos para la selección del destino de un movimiento. La elección de las mismas, influirá en el número de movimientos totales que necesitaremos realizar para resolver un determinado problema. El objetivo de aplicar distintas heurísticas, es poder determinar cuál es mejor para que tipo de problema y establecer un patrón, después de realizar un estudio de los resultados.

A la hora de implementar las heurísticas, se ha seguido el patrón de diseño Template

Method, que consiste en estructurar las clases de manera que la clase base, contenga un método que determina a la secuencia de llamadas a realizar. Dentro de estas llamadas existen llamadas a métodos virtuales, que se definen en las clases hijas. Los constructores de estas clases, al crear las instancias, inicializan un array de tres dimensiones que contiene la prioridad de cada pila, que será mayor cuanto mayor sea el valor de la prioridad, es decir, si una pila  $X$  tiene prioridad 4 y otra pila  $Y$  tiene prioridad 2, la prioridad de la pila  $X$  es mayor que la de  $Y$ . El cálculo de dicha prioridad, depende de la heurística usada, y el destino siempre será una de las pilas a las que podemos mover el contenedor, dentro de la bahía en la que se encuentre.

Dado que la prioridad es el tiempo estimado de retirada de los contenedores, la prioridad será mayor cuanto menor sea el valor del tiempo de retirada, es decir, si una pila  $X$  tiene prioridad 4 y otra pila  $Y$  tiene prioridad 2, la prioridad de la pila  $Y$  es mayor que la de  $X$ . El cálculo de dicha prioridad, depende de la heurística usada, y el destino siempre será una de las pilas a las que podemos mover el contenedor, dentro de la bahía en la que se encuentre, pudiendo tomar valores negativos.

#### 4.3.1. Aleatoria

Conociendo la posición del contenedor a mover, determina la pila de destino como cualquier pila de la bahía, a la que podemos mover un contenedor. Al instanciar esta heurística, se asigna la misma prioridad a todas las pilas. Esto se traduce en que los resultados de obtener el destino para un mismo origen pueden variar, haciendo que resolver varias veces el mismo problema con este criterio, varíe el resultado.

#### 4.3.2. Pila más vacía

A partir de la posición de origen de un movimiento, determina la pila de destino como aquella con el menor número de contenedores dentro de la bahía, dicho de otra manera, la *pila más vacía*. El valor de la prioridad para cada pila con este criterio, se determina como el número de contenedores que caben en la misma. Es decir, si la altura máxima permitida para las pilas del escenario es 8, y hay 6 contenedores apilados, la prioridad será 2 ( $8-6$ ).

#### 4.3.3. Pila más llena

Dada la posición de origen, determina el destino como, *la pila más llena* dentro de la bahía desde la que se realizará el movimiento. La prioridad de este criterio se asigna directamente como la altura de las pilas. Para una pila vacía, la prioridad se establece como 0, mientras que para una pila con tres contenedores, la prioridad será 3, seleccionando de esta manera la pila con tres contenedores contenedores.

#### 4.3.4. Pila con contenedor de mayor prioridad

Conocido el origen de un movimiento, se determina la pila de destino como *la pila con el contenedor de mayor prioridad* a la que podemos mover el contenedor. La prioridad de cada pila, será el valor negativo del tiempo de retirada estimado del contenedor con menor

tiempo de retirada dentro de la pila. Para calcularla, iteramos sobre los contenedores de la misma, lo que hace que el orden de complejidad sea mayor que para los criterios anteriores.

#### 4.3.5. Pila con contenedor de menor prioridad

Sabiendo la pila de origen de un movimiento de recolocación, esta heurística, determina la pila de destino, como la pila en la que se encuentra el contenedor de mayor prioridad de la bahía. Para este criterio tendremos en cuenta únicamente la prioridad más alta del contenedor con menor prioridad.

#### 4.3.6. Pila con media de prioridad mayor

Para determinar la pila de destino con esta heurística, se hallará la media de las prioridades de los contenedores que componen cada pila a la que podamos mover un contenedor, y la prioridad del contenedor a mover, devolviendo el valor negativo de dicha media.

#### 4.3.7. Pila con media de prioridad menor

La prioridad de cada posible pila de destino para este caso, será la media de las prioridades de los contenedores que las componen y el contenedor a mover. Para este criterio, es el número de pilas, y no la prioridad de un único contenedor, lo que determina la pila de destino.

**Ejemplos** Las Figuras 4.2, 4.3, 4.4 y 4.5 que se hallan a continuación, muestran tres movimientos de recolocación realizados con distintas heurísticas para un mismo escenario. Los rectángulos marcados con rojo son el origen de los movimientos, mientras que en verde se muestra la posición de destino.

### 4.4. Estructura y funcionamiento

A la hora de diseñar el BRP, se ha seguido el patrón de diseño Template Method, facilitando la adición de futuros algoritmos. Este patrón, consiste en la creación de una clase base, en la que se define un método con los pasos a seguir para solucionar los problemas. Dicho método, que da nombre al patrón, contiene llamadas a métodos virtuales, que son implementados en las clases hijas. De esta manera facilitamos la adición de nuevos problemas. La Figura 4.6 muestra el diagrama de clases de los algoritmos y las heurísticas.

La clase base, AlgorithmBase, define el método solve(), que resuelve el problema y es el Template Method que da nombre al patrón utilizado. El algoritmo que se define en el siguiente pseudocódigo, detalla el funcionamiento del mismo:

La clase BlocksRelocation, que extiende de AlgorithmBase, implementa los métodos orderContainers() y moveThis(). Este segundo, se encarga de extraer el contenedor, que si no está en la parte alta de alguna pila, realiza las recolocaciones, haciendo uso del método "getDestiny()" que implementan las distintas heurísticas. El pseudocódigo mostrado a continuación, detalla el funcionamiento del método moveThis():1

---

**Algoritmo 1** AlgorithmBase
 

---

$B \leftarrow \text{Bloques}(\textit{Scenario})$   
 $S \leftarrow \text{Solución}$   
**para todos**  $b \in B$  **hacer**  
    $C \leftarrow \text{orderContainers}(b)$   
   **para todos**  $c \in C$  **hacer**  
      $M \leftarrow \text{moveThis}(c, \text{position}(c))$   
      $S \leftarrow S \cup M$   
   **fin para**  
**fin para**  
**return**  $S$

---



---

**Algoritmo 2** BlockRelocation
 

---

$M \leftarrow$  conjunto vacío de movimientos  
 $\textit{Criterion}$   
 $c \leftarrow \text{contenedorARetirar}$   
**mientras**  $C$  no esté en la cima de la pila **hacer**  
    $C_t \leftarrow$  contenedor de la cima de la pila  
    $\textit{Origin} \leftarrow \text{position}(C_t)$   
    $\textit{Destiny} \leftarrow \text{getDestiny}(\textit{Criterion}, C_t, \text{priority}(C_t))$   
    $M \cup \text{mover}(C_t, \textit{Destiny})$   
**fin mientras**  
 $M \cup \text{retrieve}(C)$   
**return**  $M$

---

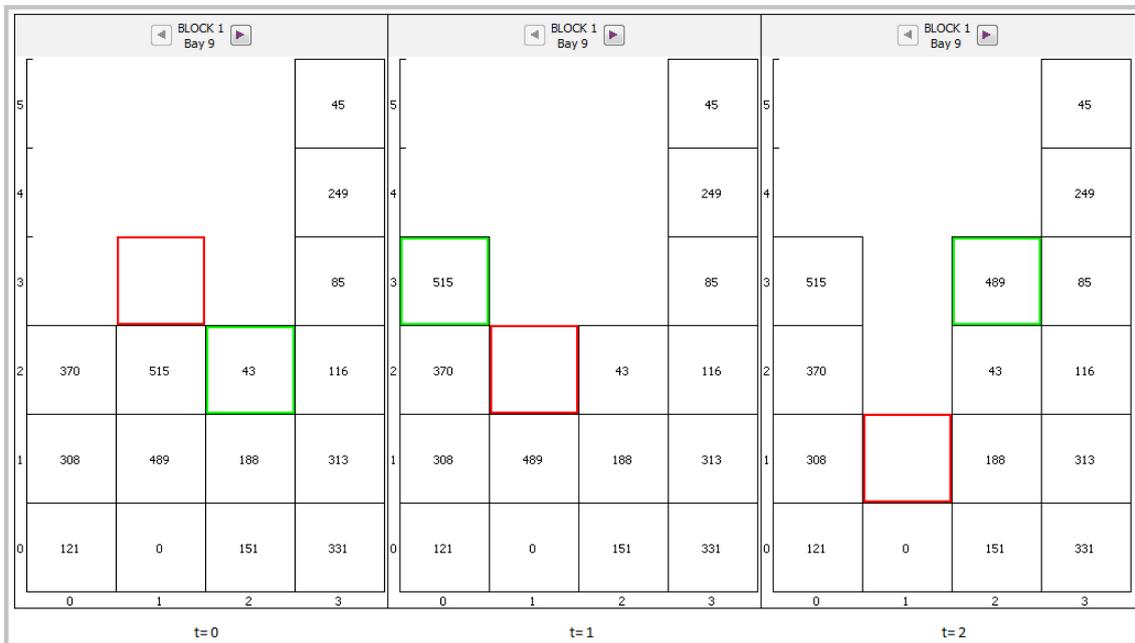


Figura 4.2: Movimientos de recolocación de contenedores con la heurística aleatoria

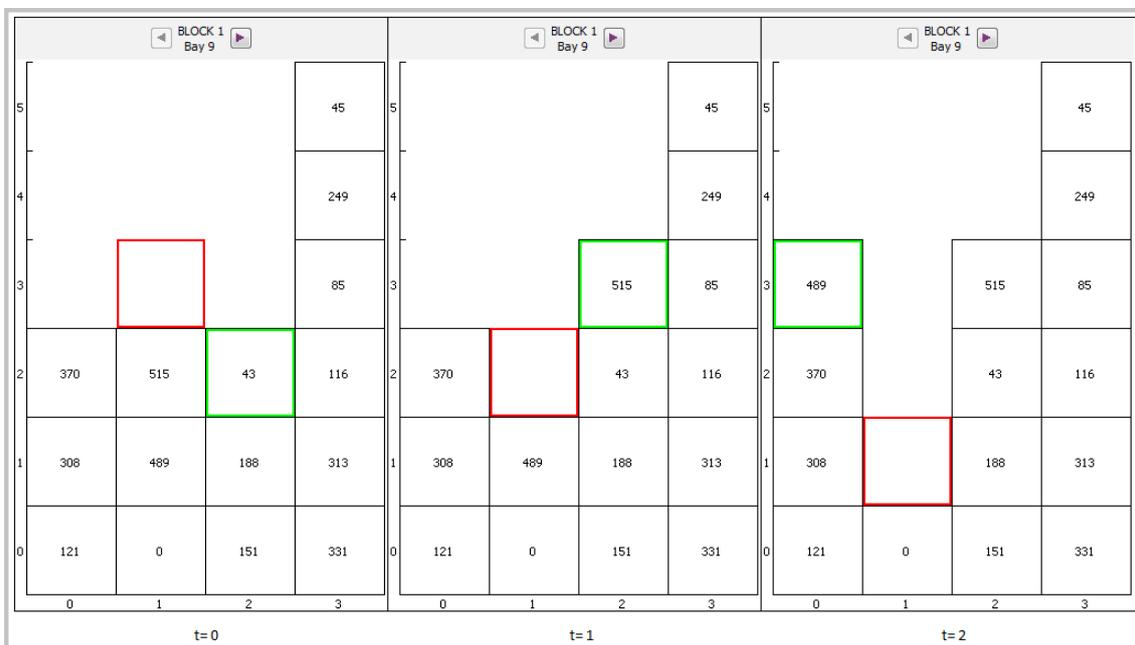


Figura 4.3: Movimientos de recolocación de contenedores con la heurística de la pila más vacía

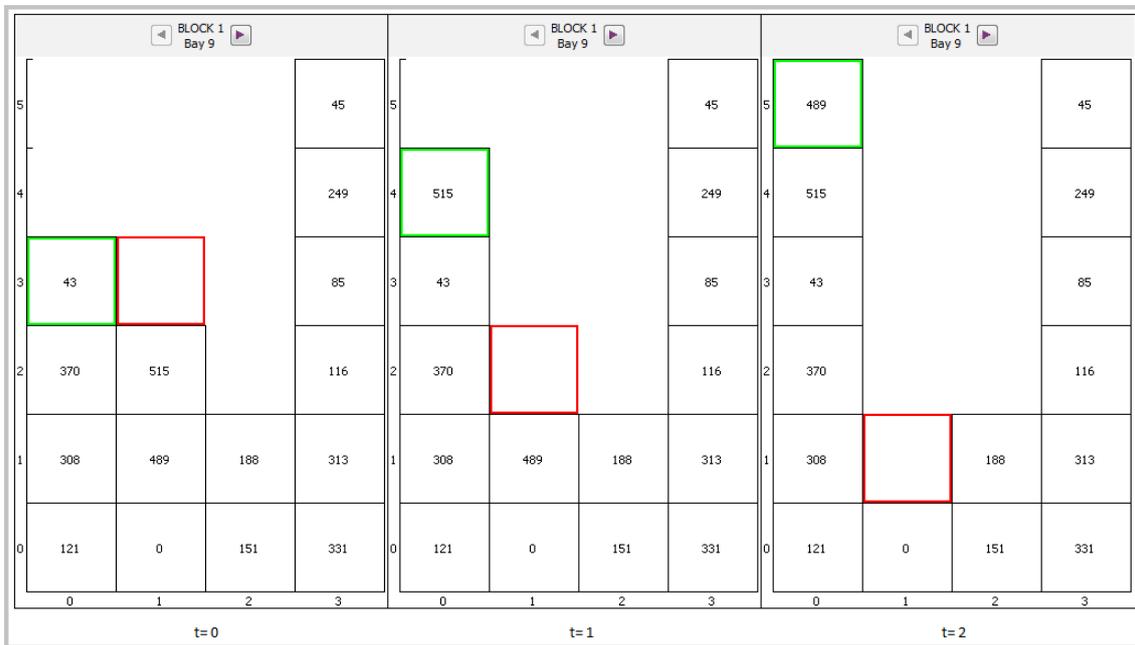


Figura 4.4: Movimientos de recolocación de contenedores con la heurística de la pila más llena

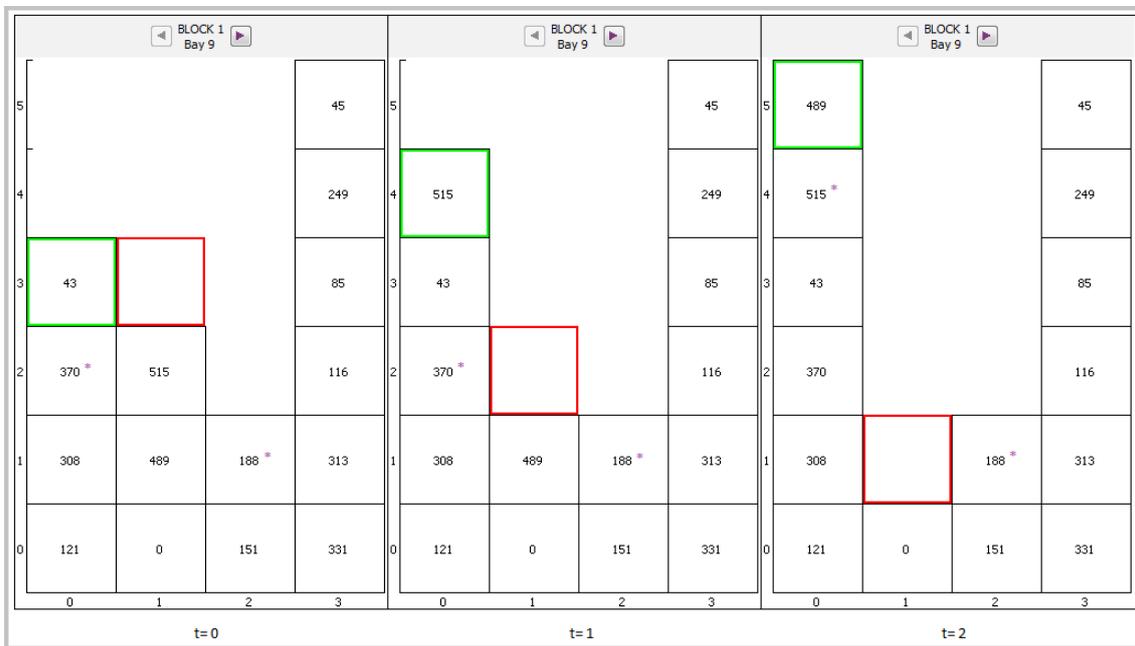


Figura 4.5: Movimientos de recolocación de contenedores con la heurística de la pila con contenedor de menor prioridad marcado con un asterisco(mayor tiempo de retirada)

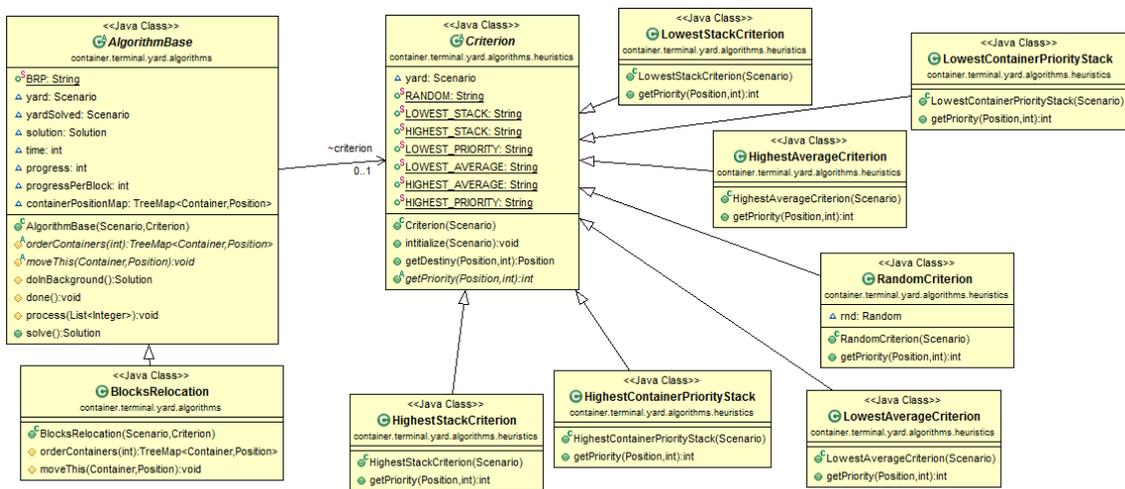


Figura 4.6: Diagrama de clases del BRP y las heurísticas



## Capítulo 5

# Generación y almacenamiento de escenarios

Los patios de las terminales de contenedores tienen una gran variedad de configuraciones. Este proyecto abarcará las dimensiones más usuales en cuanto a número de bloques, bahías, pilas, alturas y factor de llenado. Para poder tener una base con la que trabajar, crearemos un conjunto de escenarios, al que haremos referencia como banco de pruebas.

Los patios de contenedores generados, escenarios de ahora en adelante, se almacenarán en ficheros XML, con la información de cada uno de los contenedores que lo compondrán. Generaremos los escenarios aleatoriamente, con la condición de que los contenedores serán de una única dimensión, y no se generarán escenarios que no se puedan resolver. Para asegurarnos que un escenario es resoluble, cada bahía tendrá que tener, como mínimo,  $h-1$  huecos libres, siendo  $h$  el número de alturas de las pilas.

Para el banco de pruebas, crearemos escenarios con 4, 6, 8 o 10 bloques, que se componen de 20, 30 o 40 bahías. Cada bahía tendrá 4, 6, 8 ó 10 pilas con 4, 6 u 8 alturas. Los escenarios se generarán con factores de llenado que podrán ser del 20, 40, 60 u 80%. Para cada escenario, todos los bloques tendrán la misma composición, es decir, si en un escenario un bloque tiene 20 bahías, el resto de los bloques de dicho escenario tendrán el mismo número de bahías, y así con el resto de dimensiones.

### 5.1. Estructuras de datos

Para comenzar, se ha creado la estructura de datos que almacenará la información relativa a los contenedores. Para poder definir un contenedor unívocamente, necesitaremos un identificador único. Este identificador será un número entero (tipo de dato primitivo `int` de Java). Además, guardaremos para cada contenedor, el tiempo de retirada estimado, el de llegada y un nombre.

A continuación, para almacenar la estructura del patio de contenedores, se ha creado un vector dinámico que contendrá, en cada posición, un bloque. A su vez, los bloques se han generado como una matriz estática de dos dimensiones, que almacena un arreglo dinámico para simular las pilas como podemos ver en el diagrama de clases de la figura

5.1. Con esto, disponemos de las tres dimensiones necesarias para hacer referencia a un contenedor dentro de un bloque, que son la bahía, la pila y la altura. Se ha decidido esta estructura para que el acceso a los contenedores sea lo más rápido posible.

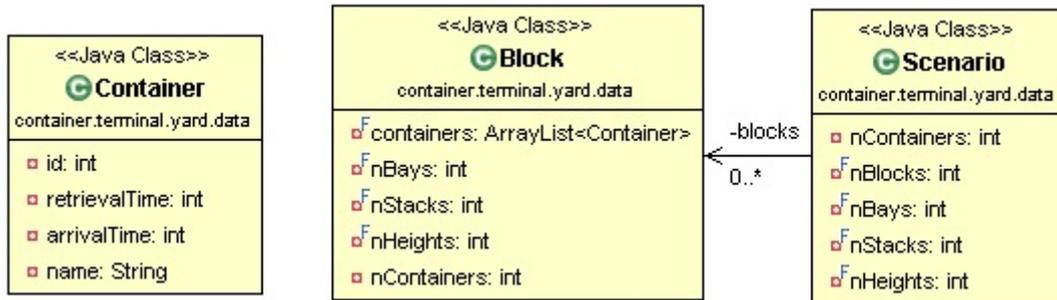


Figura 5.1: Diagrama de clases del patio de contenedores

## 5.2. Almacenamiento de los escenarios

Como se ha descrito en la sección anterior, los escenarios se almacenan en ficheros XML. Estos ficheros guardan la información tanto de la estructura del patio como de los contenedores que la componen de una manera legible, como muestra la Figura 5.2. Además, los ficheros XML son independientes del hardware y el software, y gracias a la tecnología XML Schema podemos verificar si la estructura y contenido del fichero es correcta, definiendo los campos que debe tener el fichero, y los tipos de datos que contiene cada uno.

Para la generación del banco de pruebas, los escenarios se almacenan con un nombre descriptivo, compuesto por las dimensiones del mismo y un índice, ya que se crean diez escenarios aleatorios con las mismas dimensiones. De esta manera, un escenario creado aleatoriamente con 4 bloques, 20 bahías, 6 pilas, 8 alturas y un factor de llenado del 40%, se almacenará con el nombre `b04_ba20_s06_t08_a40_sc00.xml` por defecto.

En el caso de que el escenario sea guardado por el usuario de la aplicación, éste será el que decida el nombre del fichero que lo almacenará, siendo siempre `.xml` la extensión del archivo guardado.

```
1 <?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
2 <yard>
3   <structure>
4     <blocks>4</blocks>
5     <bays>20</bays>
6     <stacks>4</stacks>
7     <heights>6</heights>
8   </structure>
9   <containers>
10    <container id="67">
11      <block>0</block>
12      <bay>0</bay>
13      <stack>0</stack>
14      <height>0</height>
15      <arrivaltime>-2147483648</arrivaltime>
16      <retrievaltime>168</retrievaltime>
17    </container>
18    .
19    .
20    .
21  6137 </container>
22  6138 <container id="293">
23  6139   <block>3</block>
24  6140   <bay>19</bay>
25  6141   <stack>3</stack>
26  6142   <height>0</height>
27  6143   <arrivaltime>-2147483648</arrivaltime>
28  6144   <retrievaltime>397</retrievaltime>
29  6145 </container>
30  6146 <container id="565">
31  6147   <block>3</block>
32  6148   <bay>19</bay>
33  6149   <stack>3</stack>
34  6150   <height>1</height>
35  6151   <arrivaltime>-2147483648</arrivaltime>
36  6152   <retrievaltime>307</retrievaltime>
37  6153 </container>
38  6154 </containers>
39  6155 </yard>
```

Figura 5.2: Estructura de los ficheros XML que almacenan los escenarios



## Capítulo 6

# Resultados

Para cuantificar cuán buenas son las heurísticas, se ha resuelto el BRP con las distintas heurísticas propuestas sobre un banco de pruebas. Este banco, contiene escenarios con 4 bloques y 20 bahías cada uno, con 4, 6, 8 ó 10 pilas, 4, 6 u 8 alturas, y factores de llenado del 20, 40, 60, y 80 %, generando instancias de cada dimensión.

Los resultados de las ejecuciones, se muestran a continuación en tablas, con el número de bloques (Bl), el número de bahías (ba), el número de pilas (S), el número de alturas (H), el factor de llenado (a), el número de contenedores (Conts), el número de recolocaciones para el mejor de los casos (Min), las recolocaciones para el peor caso ejecutado (Max) y la media de recolocaciones para todos los escenarios ejecutados con las dimensiones anteriores. La Tabla 6.1, compara los promedios obtenidos de las distintas heurísticas, con las dimensiones de los escenarios como se ha comentado con anterioridad y un conjunto de siglas para referirnos a cada heurística, que son Aleatoria (*Rnd*), la más vacía (*LS*), la más llena (*HS*), pila con el contenedor de menor prioridad (*LCP*), pila con el contenedor de mayor prioridad (*HCP*), la pila con mayor media de prioridad (*HA*) y la de menor media de prioridad (*LA*).

Para ejecutar las pruebas, se ha usado un máquina con Windows 7 de 64 bits, un procesador Intel® Core™ i7-3610QM con 4 núcleos a 2.3 GHz y 8 GB de RAM, y la versión 7 de Java.

### 6.1. Pila aleatoria

Como podemos observar en la tabla 6.2, la ejecución del BRP designando aleatoriamente la pila de destino para los movimientos de recolocación, ha supuesto una media de 1768,87 movimientos de recolocación para la extracción de 1675 contenedores, oscilando entre un mínimo de 1706 y un máximo de 1835 de éstos movimientos. Por tanto, se han realizado **1,06** recolocaciones por cada extracción. Estos resultado pueden variar para cada ejecución debido a la aleatoriedad de la selección de los destinos. Compararemos los resultados del resto de heurísticas con los de esta.

## 6.2. Pila más vacía

Los datos de la tabla 6.3 para el criterio de selección de la pila más vacía, muestran una media de 1378,07 movimientos de recolocación para la resolución de los escenarios del banco de pruebas. La media de recolocaciones, varía desde las 1333 para la suma de los mínimos y las 1425 de la suma de los máximos, obteniendo una promedio de **0,82** recolocaciones por extracción. Si comparamos este criterio con el aleatorio, vemos una mejora, realizando una media de menos de una recolocación por cada extracción. Esta mejora, se debe a que este criterio promueve el reparto equitativo de los contenedores por las pilas, reduciendo el apilamiento masivo de contenedores en una única pila.

## 6.3. Pila más llena

La selección de la pila más llena, apila los contenedores sobre determinadas pilas en cada bahía, sin comprobar la prioridad de los contenedores que la forman y dejando las pilas vacías como última opción. De esta manera, si en la pila más alta de una bahía se encuentra un contenedor de prioridad alta, las recolocaciones necesarias para poder extraer un contenedor de mayor prioridad tendrán dicha pila como destino, aumentando los movimientos totales necesarios para resolver el problema. La Tabla 6.4 contiene los datos de ejecución obtenidos usando este criterio de selección. Dicha Tabla refleja que para este criterio, se realizan una media de 2687,79 recolocaciones, aumentando para todos los escenarios si la comparamos con la Tabla 6.3. Dado que la media de extracciones es 1675, se determina que se han realizado promedio de **1,60** recolocaciones por cada extracción, superando las dos recolocaciones por cada tres contenedores a extraer.

## 6.4. Pila con contenedor de menor prioridad

Seleccionando la pila con el contenedor de menor prioridad, se han realizado una media de 1563,23 recolocaciones, como muestra la tabla 6.5. Este criterio, apila los contenedores en las pilas de cada bahía que contienen los contenedores que se extraerán al final, buscando minimizar así el total de movimientos realizados para las primeras extracciones. Los mejores casos promedian 1509 recolocaciones, mientras que para los peores se obtienen 1623. Este criterio mejora al de la pilas más llena, y se acerca en cuanto a resultados, a los obtenidos por el criterio de la pila más baja, con un promedio de **0,93** recolocaciones por cada extracción, reduciendo la barrera de un movimiento por recolocación.

## 6.5. Pila con contenedor de mayor prioridad

Seleccionar la pila con el contenedor de mayor prioridad, hace que el número de recolocaciones totales necesarias para la resolución del BRP resulte elevado, promoviendo la repetición de recolocaciones para los contenedores que estén sobre los de mayor prioridad. Como se puede comprobar en la tabla 6.6, haciendo uso de este criterio, se han obtenido una media de 2821,94 recolocaciones, oscilando entre 2719 y 2911 para los mejores y peores

casos. El promedio de recolocaciones por extracción es de **1,68** movimientos de recolocación por cada extracción. Estos resultados, se pueden comparar con los de la selección de la pila más alta, que aunque resulta mejor para las bahías de menor tamaño, se empeoran exponencialmente en cuanto las dimensiones de las bahías y el factor de llenado aumenta.

## 6.6. Pila con mayor media

La selección de la pila con mayor media de prioridad, insta a que las recolocaciones se hagan sobre las pilas que, según la media calculada, se vaciarán primero, elevando el número de movimientos realizados para la resolución del BRP. Este criterio ha obtenido una media de 3093,29 movimientos de recolocación, como se observa en la tabla 6.8, oscilando entre 3004 y 3184 recolocaciones. Esto la coloca como la peor de las heurísticas estudiadas, realizando un promedio de **1,84** recolocaciones por extracción y acercándose a las 2 recolocaciones por extracción. Si la comparamos con la selección de la pila más alta, se puede observar en sus tablas de resultados que los promedios de recolocación por extracción de los escenarios con menores dimensiones se asemeja, pero la diferencia crece en cuanto aumentan las dimensiones y las pilas contienen un mayor número de contenedores.

## 6.7. Pila con menor media

La selección de la pila con menor media de prioridad, asigna un peso a la prioridad de los contenedores relativo al tamaño de la pila. De esta manera, cuanto mayor número de contenedores de mayor prioridad tenga una pila, será más fácil que sea descartada como destino. Este método calcula, de esta manera, una prioridad para la pila acorde a su contenido. La tabla 6.7, muestra los resultados del uso de este criterio como destino para los movimientos de recolocación. Los resultados obtenidos, 1217,67 recolocaciones de media por cada extracción, oscilan entre las 1173 de los mejores casos, y los 1262 de los peores. El número de recolocaciones por extracción, que mejora al criterio aleatorio, es de **0,73**. Como se puede observar en las Tablas de resultados, los promedios de ésta heurística mejoran considerablemente a los de la selección de la pila más vacía, haciéndose notar la diferencia para los escenarios mayores.

## 6.8. Comparación de las distintas heurísticas

La tabla 6.1 muestra la comparación de los resultados obtenidos con las distintas heurísticas. Se deduce de dicha tabla, que para el banco de pruebas, la peor heurística ha resultado ser la que selecciona la pila de destino como la que tenga la media de prioridad más alta, mientras que la mejor ha sido la selección de la pila con la menor media de prioridad, con 1,85 y 0,63 recolocaciones por extracción, respectivamente. Se puede concluir, que para designar la pila de destino, para el conjunto de escenarios del banco de pruebas, ha sido siempre mejor usar los criterios de selección en los que en el destino se halla la prioridad más baja, es decir, los tiempos estimados de retirada mayores, concretamente la heurística de la pila con la media de prioridad más baja.

Bl	ba	S	H	a	Rnd	LS	HS	LCP	HCP	HA	LA
4	20	4	4	20	0.22	<b>0.18</b>	0.28	0.18	0.20	0.29	<b>0.18</b>
4	20	4	4	40	0.44	0.36	0.55	<b>0.35</b>	0.45	0.61	<b>0.35</b>
4	20	4	4	60	0.64	0.54	0.79	0.54	0.70	0.86	<b>0.52</b>
4	20	4	4	80	0.79	0.68	0.93	0.69	0.88	1.04	<b>0.65</b>
4	20	4	6	20	0.34	0.28	0.45	0.28	0.33	0.47	<b>0.27</b>
4	20	4	6	40	0.71	0.57	0.96	0.60	0.88	1.02	<b>0.55</b>
4	20	4	6	60	1.01	0.84	1.32	0.90	1.34	1.44	<b>0.78</b>
4	20	4	8	20	0.46	0.37	0.64	0.38	0.51	0.66	<b>0.37</b>
4	20	4	8	40	0.95	0.77	1.35	0.87	1.35	1.40	<b>0.72</b>
4	20	4	8	60	1.39	1.18	1.88	1.33	2.00	2.00	<b>1.09</b>
4	20	6	4	20	0.21	<b>0.17</b>	0.30	0.17	0.18	0.35	0.18
4	20	6	4	40	0.43	<b>0.33</b>	0.63	<b>0.33</b>	0.42	0.75	<b>0.33</b>
4	20	6	4	60	0.62	0.49	0.85	0.49	0.73	1.04	<b>0.46</b>
4	20	6	4	80	0.79	0.65	1.01	0.65	0.95	1.23	<b>0.60</b>
4	20	6	6	20	0.35	<b>0.27</b>	0.55	0.27	0.31	0.61	<b>0.27</b>
4	20	6	6	40	0.69	0.52	1.08	0.56	0.96	1.23	<b>0.49</b>
4	20	6	6	60	1.05	0.81	1.50	0.89	1.58	1.75	<b>0.73</b>
4	20	6	6	80	1.29	1.06	1.73	1.15	1.86	2.03	<b>0.95</b>
4	20	6	8	20	0.46	<b>0.33</b>	0.74	0.35	0.49	0.81	<b>0.33</b>
4	20	6	8	40	0.96	0.71	1.60	0.84	1.65	1.68	<b>0.65</b>
4	20	6	8	60	1.42	1.11	2.14	1.32	2.42	2.33	<b>0.97</b>
4	20	6	8	80	1.77	1.48	2.43	1.68	2.69	2.72	<b>1.29</b>
4	20	8	4	20	0.23	<b>0.18</b>	0.36	<b>0.18</b>	0.18	0.43	<b>0.18</b>
4	20	8	4	40	0.43	<b>0.31</b>	0.66	<b>0.31</b>	0.40	0.87	<b>0.31</b>
4	20	8	4	60	0.63	0.47	0.92	0.47	0.76	1.20	<b>0.44</b>
4	20	8	4	80	0.78	0.63	1.07	0.62	1.00	1.38	<b>0.57</b>
4	20	8	6	20	0.34	<b>0.25</b>	0.57	<b>0.25</b>	0.28	0.69	0.26
4	20	8	6	40	0.70	0.49	1.21	0.55	1.02	1.40	<b>0.47</b>
4	20	8	6	60	1.01	0.76	1.58	0.85	1.71	1.89	<b>0.67</b>
4	20	8	6	80	1.30	1.05	1.85	1.14	1.99	2.21	<b>0.91</b>
4	20	8	8	20	0.46	<b>0.33</b>	0.83	0.34	0.48	0.95	0.34
4	20	8	8	40	0.95	0.69	1.76	0.85	1.90	1.86	<b>0.62</b>
4	20	8	8	60	1.40	1.06	2.29	1.32	2.68	2.49	<b>0.91</b>
4	20	8	8	80	1.79	1.44	2.58	1.69	2.90	2.93	<b>1.22</b>
4	20	10	4	20	0.22	<b>0.17</b>	0.35	0.17	0.17	0.48	0.18
4	20	10	4	40	0.45	<b>0.32</b>	0.74	0.32	0.41	1.01	0.33
4	20	10	4	60	0.63	0.46	0.96	0.47	0.79	1.31	<b>0.43</b>
4	20	10	4	80	0.80	0.62	1.11	0.62	1.06	1.50	<b>0.56</b>
4	20	10	6	20	0.34	<b>0.25</b>	0.64	0.25	0.27	0.80	0.26
4	20	10	6	40	0.70	0.48	1.24	0.54	1.07	1.50	<b>0.46</b>
4	20	10	6	60	1.04	0.75	1.69	0.86	1.87	2.02	<b>0.65</b>
4	20	10	6	80	1.30	1.01	1.91	1.11	2.10	2.34	<b>0.86</b>
4	20	10	8	20	0.46	<b>0.32</b>	0.90	0.33	0.45	1.06	0.33
4	20	10	8	40	0.97	0.68	1.86	0.85	2.10	2.00	<b>0.61</b>
4	20	10	8	60	1.40	1.04	2.39	1.31	2.88	2.61	<b>0.87</b>
4	20	10	8	80	1.77	1.41	2.68	1.68	3.04	3.04	<b>1.17</b>
<b>TOTAL</b>					1.06	0.82	1.6	0.93	1.68	1.85	<b>0.73</b>

Tabla 6.1: Tabla comparativa de los promedios de recolocación por cada extracción para las distintas heurísticas. En negrita, los mejores promedios

Criterion Random									
Bl	ba	S	H	a	Conts	Min	Max	Avg	Promedio
4	20	4	4	20	256	39	70	56.00	0.22
4	20	4	4	40	512	212	252	224.10	0.44
4	20	4	4	60	768	460	517	488.2	0.64
4	20	4	4	80	1024	762	873	806.2	0.79
4	20	4	6	20	384	109	149	128.9	0.34
4	20	4	6	40	768	499	563	542.1	0.71
4	20	4	6	60	1152	1089	1242	1162.0	1.01
4	20	4	8	20	512	202	288	238.0	0.46
4	20	4	8	40	1024	902	1029	973.8	0.95
4	20	4	8	60	1536	2013	2234	2140.5	1.39
4	20	6	4	20	384	69	93	82.5	0.21
4	20	6	4	40	768	301	357	333.5	0.43
4	20	6	4	60	1152	690	737	715.0	0.62
4	20	6	4	80	1536	1171	1273	1209.0	0.79
4	20	6	6	20	576	187	212	201.7	0.35
4	20	6	6	40	1152	729	832	793.4	0.69
4	20	6	6	60	1728	1722	1865	1815.5	1.05
4	20	6	6	80	2304	2899	3075	2973.6	1.29
4	20	6	8	20	768	326	379	350.1	0.46
4	20	6	8	40	1536	1419	1511	1472.9	0.96
4	20	6	8	60	2304	3188	3371	3270.6	1.42
4	20	6	8	80	3072	5372	5534	5442.6	1.77
4	20	8	4	20	512	98	133	115.2	0.23
4	20	8	4	40	1024	419	479	436.4	0.43
4	20	8	4	60	1536	924	1011	965.9	0.63
4	20	8	4	80	2048	1564	1643	1602.8	0.78
4	20	8	6	20	768	230	298	257.6	0.34
4	20	8	6	40	1536	992	1125	1071.0	0.70
4	20	8	6	60	2304	2269	2396	2322.9	1.01
4	20	8	6	80	3072	3896	4063	4003.8	1.30
4	20	8	8	20	1024	439	514	474.6	0.46
4	20	8	8	40	2048	1881	2095	1948.0	0.95
4	20	8	8	60	3072	4199	4401	4299.8	1.40
4	20	8	8	80	4096	7119	7691	7327.9	1.79
4	20	10	4	20	640	118	151	138.9	0.22
4	20	10	4	40	1280	533	619	579.0	0.45
4	20	10	4	60	1920	1155	1250	1204.1	0.63
4	20	10	4	80	2560	1961	2162	2041.8	0.80
4	20	10	6	20	960	305	348	328.4	0.34
4	20	10	6	40	1920	1243	1383	1335.7	0.70
4	20	10	6	60	2880	2906	3054	2988.6	1.04
4	20	10	6	80	3840	4847	5135	4978.1	1.30
4	20	10	8	20	1280	527	642	584.7	0.46
4	20	10	8	40	2560	2409	2518	2482.0	0.97
4	20	10	8	60	3840	5241	5534	5387.9	1.40
4	20	10	8	80	5120	8847	9334	9072.6	1.77
<b>TOTAL</b>					1675	1706	1835	1768.87	1.06

Tabla 6.2: Tabla de resultados con la heurística aleatoria

Criterion Lowest Stack									
Bl	ba	S	H	a	Conts	Min	Max	Avg	Promedio
4	20	4	4	20	256	35	58	46.3	0.18
4	20	4	4	40	512	162	194	182.5	0.36
4	20	4	4	60	768	390	444	412.7	0.54
4	20	4	4	80	1024	654	750	700.7	0.68
4	20	4	6	20	384	90	127	105.7	0.28
4	20	4	6	40	768	400	462	440.8	0.57
4	20	4	6	60	1152	921	1036	973.2	0.84
4	20	4	8	20	512	166	223	190.7	0.37
4	20	4	8	40	1024	740	823	792.5	0.77
4	20	4	8	60	1536	1717	1881	1813.9	1.18
4	20	6	4	20	384	55	72	65.5	0.17
4	20	6	4	40	768	230	279	253.9	0.33
4	20	6	4	60	1152	544	589	564.5	0.49
4	20	6	4	80	1536	962	1053	1003.5	0.65
4	20	6	6	20	576	137	171	153	0.27
4	20	6	6	40	1152	574	631	599.9	0.52
4	20	6	6	60	1728	1366	1467	1398	0.81
4	20	6	6	80	2304	2393	2506	2451.5	1.06
4	20	6	8	20	768	242	282	256.4	0.33
4	20	6	8	40	1536	1040	1126	1097.2	0.71
4	20	6	8	60	2304	2486	2620	2557.9	1.11
4	20	6	8	80	3072	4448	4655	4553.1	1.48
4	20	8	4	20	512	75	101	90.2	0.18
4	20	8	4	40	1024	304	350	318.2	0.31
4	20	8	4	60	1536	688	753	723	0.47
4	20	8	4	80	2048	1223	1328	1285.7	0.63
4	20	8	6	20	768	171	234	191	0.25
4	20	8	6	40	1536	723	809	757.3	0.49
4	20	8	6	60	2304	1705	1793	1753.4	0.76
4	20	8	6	80	3072	3144	3344	3210.4	1.05
4	20	8	8	20	1024	324	357	341.7	0.33
4	20	8	8	40	2048	1370	1505	1411.9	0.69
4	20	8	8	60	3072	3189	3308	3257.9	1.06
4	20	8	8	80	4096	5773	5994	5900.4	1.44
4	20	10	4	20	640	95	127	110.2	0.17
4	20	10	4	40	1280	392	431	408.3	0.32
4	20	10	4	60	1920	831	926	887.5	0.46
4	20	10	4	80	2560	1512	1673	1585.7	0.62
4	20	10	6	20	960	217	250	236.2	0.25
4	20	10	6	40	1920	891	963	930.7	0.48
4	20	10	6	60	2880	2100	2197	2146.6	0.75
4	20	10	6	80	3840	3815	3966	3889	1.01
4	20	10	8	20	1280	380	446	406.8	0.32
4	20	10	8	40	2560	1691	1768	1734.1	0.68
4	20	10	8	60	3840	3869	4071	3977.2	1.04
4	20	10	8	80	5120	7086	7418	7224.4	1.41
<b>TOTAL</b>					1675	1333	1425	1378.07	0.82

Tabla 6.3: Tabla de resultados con la heurística de la pila más baja

Criterion Highest Stack									
Bl	ba	S	H	a	Conts	Min	Max	Avg	Promedio
4	20	4	4	20	256	57	89	70.6	0.28
4	20	4	4	40	512	262	323	281.6	0.55
4	20	4	4	60	768	572	649	604.7	0.79
4	20	4	4	80	1024	905	1013	954.4	0.93
4	20	4	6	20	384	154	193	172.1	0.45
4	20	4	6	40	768	664	812	740.5	0.96
4	20	4	6	60	1152	1418	1600	1518.1	1.32
4	20	4	8	20	512	281	394	327.2	0.64
4	20	4	8	40	1024	1295	1447	1385.1	1.35
4	20	4	8	60	1536	2791	3016	2884.1	1.88
4	20	6	4	20	384	96	132	116.2	0.30
4	20	6	4	40	768	446	545	486.6	0.63
4	20	6	4	60	1152	935	1035	980.3	0.85
4	20	6	4	80	1536	1507	1605	1549.1	1.01
4	20	6	6	20	576	281	369	314.5	0.55
4	20	6	6	40	1152	1145	1313	1246.7	1.08
4	20	6	6	60	1728	2498	2700	2595.2	1.50
4	20	6	6	80	2304	3914	4124	3984	1.73
4	20	6	8	20	768	513	651	570.4	0.74
4	20	6	8	40	1536	2297	2560	2453.7	1.60
4	20	6	8	60	2304	4822	5048	4926.7	2.14
4	20	6	8	80	3072	7311	7654	7473.4	2.43
4	20	8	4	20	512	144	217	186.3	0.36
4	20	8	4	40	1024	644	732	680.8	0.66
4	20	8	4	60	1536	1341	1495	1413.2	0.92
4	20	8	4	80	2048	2100	2254	2185.3	1.07
4	20	8	6	20	768	376	531	435.3	0.57
4	20	8	6	40	1536	1788	1987	1861	1.21
4	20	8	6	60	2304	3466	3733	3631.4	1.58
4	20	8	6	80	3072	5601	5844	5697.2	1.85
4	20	8	8	20	1024	783	904	854.3	0.83
4	20	8	8	40	2048	3481	3782	3601.6	1.76
4	20	8	8	60	3072	6864	7105	7027.6	2.29
4	20	8	8	80	4096	10270	10915	10569.1	2.58
4	20	10	4	20	640	197	252	226.6	0.35
4	20	10	4	40	1280	887	1044	941.9	0.74
4	20	10	4	60	1920	1707	1907	1844.3	0.96
4	20	10	4	80	2560	2766	2956	2841.6	1.11
4	20	10	6	20	960	567	696	609.9	0.64
4	20	10	6	40	1920	2276	2481	2371.3	1.24
4	20	10	6	60	2880	4757	5038	4858.4	1.69
4	20	10	6	80	3840	7162	7445	7338	1.91
4	20	10	8	20	1280	1000	1279	1149.2	0.90
4	20	10	8	40	2560	4619	4943	4770.6	1.86
4	20	10	8	60	3840	9052	9389	9165.6	2.39
4	20	10	8	80	5120	13385	13911	13742.6	2.68
<b>TOTAL</b>					1675	2595	2785	2687.79	1.60

Tabla 6.4: Tabla de resultados con la heurística de la pila más alta

Criterion Lowest Priority Stack									
Bl	ba	S	H	a	Conts	Min	Max	Avg	Promedio
4	20	4	4	20	256	35	56	46.50	0.18
4	20	4	4	40	512	165	200	181.60	0.35
4	20	4	4	60	768	384	449	413.80	0.54
4	20	4	4	80	1024	666	765	705.50	0.69
4	20	4	6	20	384	90	130	105.80	0.28
4	20	4	6	40	768	397	487	460.60	0.60
4	20	4	6	60	1152	959	1107	1041.00	0.90
4	20	4	8	20	512	165	220	196.00	0.38
4	20	4	8	40	1024	836	961	894.80	0.87
4	20	4	8	60	1536	1953	2126	2043.30	1.33
4	20	6	4	20	384	54	70	64.90	0.17
4	20	6	4	40	768	227	277	249.60	0.33
4	20	6	4	60	1152	539	590	565.20	0.49
4	20	6	4	80	1536	953	1025	993.20	0.65
4	20	6	6	20	576	138	174	152.80	0.27
4	20	6	6	40	1152	608	703	650.70	0.56
4	20	6	6	60	1728	1444	1609	1536.70	0.89
4	20	6	6	80	2304	2602	2735	2645.60	1.15
4	20	6	8	20	768	242	316	266.90	0.35
4	20	6	8	40	1536	1257	1344	1297.90	0.84
4	20	6	8	60	2304	2934	3231	3034.60	1.32
4	20	6	8	80	3072	5012	5272	5152.10	1.68
4	20	8	4	20	512	74	101	90.00	0.18
4	20	8	4	40	1024	303	353	317.90	0.31
4	20	8	4	60	1536	677	752	726.70	0.47
4	20	8	4	80	2048	1235	1352	1277.70	0.62
4	20	8	6	20	768	167	237	190.70	0.25
4	20	8	6	40	1536	784	884	842.20	0.55
4	20	8	6	60	2304	1898	2064	1964.50	0.85
4	20	8	6	80	3072	3426	3557	3489.90	1.14
4	20	8	8	20	1024	328	375	349.70	0.34
4	20	8	8	40	2048	1669	1820	1746.80	0.85
4	20	8	8	60	3072	3925	4141	4040.50	1.32
4	20	8	8	80	4096	6835	7186	6917.10	1.69
4	20	10	4	20	640	95	125	110.00	0.17
4	20	10	4	40	1280	393	428	410.50	0.32
4	20	10	4	60	1920	857	945	899.90	0.47
4	20	10	4	80	2560	1556	1662	1593.60	0.62
4	20	10	6	20	960	221	253	236.70	0.25
4	20	10	6	40	1920	985	1073	1030.10	0.54
4	20	10	6	60	2880	2429	2518	2483.60	0.86
4	20	10	6	80	3840	4216	4410	4278.90	1.11
4	20	10	8	20	1280	387	465	420.30	0.33
4	20	10	8	40	2560	2102	2269	2183.30	0.85
4	20	10	8	60	3840	4865	5144	5023.00	1.31
4	20	10	8	80	5120	8362	8727	8585.80	1.68
<b>TOTAL</b>					1675	1509	1623	1563.23	0.93

Tabla 6.5: Tabla de resultados con la heurística pila con el contenedor de menor prioridad

Criterion Highest Priority Stack									
Bl	ba	S	H	a	Conts	Min	Max	Avg	Promedio
4	20	4	4	20	256	35	60	50.2	0.20
4	20	4	4	40	512	204	250	231.3	0.45
4	20	4	4	60	768	508	580	538.4	0.70
4	20	4	4	80	1024	857	970	904.4	0.88
4	20	4	6	20	384	109	145	125.5	0.33
4	20	4	6	40	768	616	708	676.5	0.88
4	20	4	6	60	1152	1435	1608	1547.7	1.34
4	20	4	8	20	512	220	299	258.8	0.51
4	20	4	8	40	1024	1319	1448	1379.0	1.35
4	20	4	8	60	1536	2896	3234	3079.1	2.00
4	20	6	4	20	384	55	76	68.1	0.18
4	20	6	4	40	768	274	364	324.2	0.42
4	20	6	4	60	1152	813	878	837.8	0.73
4	20	6	4	80	1536	1396	1520	1457.0	0.95
4	20	6	6	20	576	156	218	179.5	0.31
4	20	6	6	40	1152	1013	1175	1110.1	0.96
4	20	6	6	60	1728	2614	2789	2726.4	1.58
4	20	6	6	80	2304	4200	4437	4277.2	1.86
4	20	6	8	20	768	336	454	373.2	0.49
4	20	6	8	40	1536	2387	2677	2536.2	1.65
4	20	6	8	60	2304	5405	5714	5585.5	2.42
4	20	6	8	80	3072	8146	8468	8269.7	2.69
4	20	8	4	20	512	76	102	91.6	0.18
4	20	8	4	40	1024	373	463	412.9	0.40
4	20	8	4	60	1536	1070	1249	1164.9	0.76
4	20	8	4	80	2048	1972	2148	2051.0	1.00
4	20	8	6	20	768	181	273	215.0	0.28
4	20	8	6	40	1536	1499	1703	1573.9	1.02
4	20	8	6	60	2304	3792	4094	3941.4	1.71
4	20	8	6	80	3072	6016	6235	6111.4	1.99
4	20	8	8	20	1024	412	551	490.5	0.48
4	20	8	8	40	2048	3756	4194	3891.8	1.90
4	20	8	8	60	3072	8118	8352	8228.4	2.68
4	20	8	8	80	4096	11325	12103	11872.7	2.90
4	20	10	4	20	640	96	129	111.1	0.17
4	20	10	4	40	1280	468	573	523.7	0.41
4	20	10	4	60	1920	1433	1584	1518.3	0.79
4	20	10	4	80	2560	2593	2826	2719.6	1.06
4	20	10	6	20	960	229	300	262.3	0.27
4	20	10	6	40	1920	1919	2154	2056.7	1.07
4	20	10	6	60	2880	5165	5505	5374.9	1.87
4	20	10	6	80	3840	8002	8185	8081.6	2.10
4	20	10	8	20	1280	482	658	579.8	0.45
4	20	10	8	40	2560	5127	5463	5373.8	2.10
4	20	10	8	60	3840	10840	11222	11045.2	2.88
4	20	10	8	80	5120	15147	15799	15580.9	3.04
<b>TOTAL</b>					1675	2719	2911	2821.9	1.68

Tabla 6.6: Tabla de resultados con la heurística de la pila con el contenedor de mayor prioridad

Criterion Lowest Average Priority Stack									
Bl	ba	S	H	a	Conts	Min	Max	Avg	Promedio
4	20	4	4	20	256	35	58	46.8	0.18
4	20	4	4	40	512	153	187	176.8	0.35
4	20	4	4	60	768	371	439	399.0	0.52
4	20	4	4	80	1024	629	711	664.3	0.65
4	20	4	6	20	384	91	128	104.4	0.27
4	20	4	6	40	768	366	446	421.4	0.55
4	20	4	6	60	1152	822	960	901.6	0.78
4	20	4	8	20	512	163	220	188.5	0.37
4	20	4	8	40	1024	695	765	732.2	0.72
4	20	4	8	60	1536	1562	1738	1669.5	1.09
4	20	6	4	20	384	55	76	68.5	0.18
4	20	6	4	40	768	229	267	250.6	0.33
4	20	6	4	60	1152	511	543	529.3	0.46
4	20	6	4	80	1536	901	960	927.4	0.60
4	20	6	6	20	576	144	173	155.9	0.27
4	20	6	6	40	1152	544	597	565.5	0.49
4	20	6	6	60	1728	1210	1313	1268.0	0.73
4	20	6	6	80	2304	2120	2267	2197.1	0.95
4	20	6	8	20	768	227	282	256.8	0.33
4	20	6	8	40	1536	987	1030	1005.1	0.65
4	20	6	8	60	2304	2141	2381	2246.2	0.97
4	20	6	8	80	3072	3864	4074	3977.9	1.29
4	20	8	4	20	512	77	108	93.8	0.18
4	20	8	4	40	1024	302	353	318.3	0.31
4	20	8	4	60	1536	643	714	681.6	0.44
4	20	8	4	80	2048	1108	1212	1164.7	0.57
4	20	8	6	20	768	181	248	201.9	0.26
4	20	8	6	40	1536	683	750	721.1	0.47
4	20	8	6	60	2304	1518	1572	1545.2	0.67
4	20	8	6	80	3072	2713	2876	2781.7	0.91
4	20	8	8	20	1024	332	365	346.0	0.34
4	20	8	8	40	2048	1246	1350	1278.0	0.62
4	20	8	8	60	3072	2746	2865	2784.4	0.91
4	20	8	8	80	4096	4885	5155	5008.3	1.22
4	20	10	4	20	640	101	133	117.9	0.18
4	20	10	4	40	1280	400	441	418.8	0.33
4	20	10	4	60	1920	780	861	823.4	0.43
4	20	10	4	80	2560	1390	1486	1428.7	0.56
4	20	10	6	20	960	225	271	252.5	0.26
4	20	10	6	40	1920	822	903	874.9	0.46
4	20	10	6	60	2880	1853	1888	1871.0	0.65
4	20	10	6	80	3840	3231	3350	3284.5	0.86
4	20	10	8	20	1280	384	446	416.6	0.33
4	20	10	8	40	2560	1511	1589	1554.3	0.61
4	20	10	8	60	3840	3212	3399	3323.7	0.87
4	20	10	8	80	5120	5831	6142	5968.5	1.17
<b>TOTAL</b>					1675	1173	1262	1217.67	0.73

Tabla 6.7: Tabla de resultados con la heurística de la pila con menor prioridad media

Criterion Highest Average Priority Stack									
Bl	ba	S	H	a	Conts	Min	Max	Avg	Promedio
4	20	4	4	20	256	62	89	74.0	0.29
4	20	4	4	40	512	279	357	310.0	0.61
4	20	4	4	60	768	634	699	663.8	0.86
4	20	4	4	80	1024	995	1136	1060.9	1.04
4	20	4	6	20	384	154	198	179.2	0.47
4	20	4	6	40	768	745	826	783.5	1.02
4	20	4	6	60	1152	1580	1736	1664.2	1.44
4	20	4	8	20	512	283	392	338.0	0.66
4	20	4	8	40	1024	1373	1476	1430.4	1.40
4	20	4	8	60	1536	2936	3178	3068.0	2.00
4	20	6	4	20	384	111	151	133.5	0.35
4	20	6	4	40	768	522	646	576.8	0.75
4	20	6	4	60	1152	1140	1262	1192.5	1.04
4	20	6	4	80	1536	1829	1952	1896.7	1.23
4	20	6	6	20	576	315	390	352.9	0.61
4	20	6	6	40	1152	1339	1493	1411.7	1.23
4	20	6	6	60	1728	2922	3102	3015.5	1.75
4	20	6	6	80	2304	4617	4797	4687.4	2.03
4	20	6	8	20	768	567	684	623.7	0.81
4	20	6	8	40	1536	2430	2679	2576.1	1.68
4	20	6	8	60	2304	5243	5533	5376.3	2.33
4	20	6	8	80	3072	8248	8443	8348.9	2.72
4	20	8	4	20	512	185	257	222.7	0.43
4	20	8	4	40	1024	845	952	895.8	0.87
4	20	8	4	60	1536	1784	1912	1846.4	1.20
4	20	8	4	80	2048	2748	2926	2826.6	1.38
4	20	8	6	20	768	442	612	526.7	0.69
4	20	8	6	40	1536	2062	2241	2152.5	1.40
4	20	8	6	60	2304	4256	4423	4348.1	1.89
4	20	8	6	80	3072	6701	6935	6798.3	2.21
4	20	8	8	20	1024	915	1044	972.2	0.95
4	20	8	8	40	2048	3710	4030	3819.1	1.86
4	20	8	8	60	3072	7552	7751	7653.6	2.49
4	20	8	8	80	4096	11694	12259	12013.6	2.93
4	20	10	4	20	640	268	331	307.8	0.48
4	20	10	4	40	1280	1240	1372	1292.6	1.01
4	20	10	4	60	1920	2359	2600	2505.6	1.31
4	20	10	4	80	2560	3713	4029	3845.6	1.50
4	20	10	6	20	960	724	823	764.4	0.80
4	20	10	6	40	1920	2737	2992	2884.0	1.50
4	20	10	6	60	2880	5716	5990	5826.4	2.02
4	20	10	6	80	3840	8882	9123	8981.4	2.34
4	20	10	8	20	1280	1253	1424	1361.0	1.06
4	20	10	8	40	2560	4984	5246	5114.5	2.00
4	20	10	8	60	3840	9817	10225	10025.1	2.61
4	20	10	8	80	5120	15293	15754	15543.5	3.04
<b>TOTAL</b>					1675	3004	3184	3093.3	1.85

Tabla 6.8: Tabla de resultados con la heurística de la pila con mayor prioridad media



## Capítulo 7

# Conclusiones y trabajos futuros

### 7.1. Optimización de las tareas de una terminal portuaria de contenedores

Tras estudiar el estado del arte, se deduce que la gestión las terminales portuarias de contenedores, abarcan una gran variedad de problemas de optimización. Cada terminal posee distintos recursos y materiales, y el grado de mecanización varía de unas a otras. Desarrollar un sistema para la optimización de todos los factores influyentes en la productividad de una terminal, es una tarea compleja por la casuística de las distintas terminales repartidas por el planeta.

### 7.2. La aplicación

La aplicación permite el estudio del BRP para las heurísticas propuestas, y está desarrollada en Java, otorgándole la portabilidad a otros sistemas operativos. Así, la aplicación supone un punto de partida para la creación de una plataforma para el estudio de los problemas de los patios de terminales de las terminales portuarias de contenedores. La reproducción de las soluciones permite comprobar el funcionamiento de las distintas heurísticas.

### 7.3. Resultados

El BRP es un problema que se puede aplicar tanto para la descarga de los buques, como para retirar los contenedores del patio. Dicho problema de optimización, se da en la todas las terminales de contenedores. Tras estudiar los resultados obtenidos, se puede decir que las heurísticas que apilan los contenedores sobre los de mayor prioridad, son una mala opción a la hora de elegir el destino de las recolocaciones, generando pilas muy altas sobre los contenedores de mayor prioridad, resultando esto en la recolocación de los mismos contenedores varias veces. Por otro lado, se ha comprobado que los mejores resultados se obtienen con las heurísticas que realizan un reparto más equitativo de los contenedores, o apilan los mismos sobre los contenedores de menor prioridad. La heurística que calcula

la media de las prioridades de los contenedores y selecciona la de menor prioridad, fué la que mejor resultados ha demostrado.

## 7.4. Alcance

Inicialmente, el proyecto constaba en realizar la interfaz gráfica para la resolución y visualización de los problemas de las terminales. Al realizar una primera versión de dicha interfaz, se incluyó la resolución del BRP para testear la reproducción de las soluciones, que junto con el desarrollo de las heurísticas incrementó notablemente el trabajo a realizar.

## 7.5. Tabajos futuros

Para convertir la aplicación desarrollada para el estudio de los problemas de los patios de contenedores de las terminales portuarias, se necesitan diversas mejoras como las que se listan a continuación.

- Añadir la resolución de otros problemas que se dan en los patios de las terminales portuarias de contenedores, como por ejemplo el Pre-marshalling Problem y el Stacking Problem. Para la correcta muestra de dichos problemas, se requeriría la adición a las vistas de pilas con los contenedores de entrada y los contenedores que han sido retirados del patio.
- Mejorar el módulo de soluciones, permitiendo el almacenamiento y apertura de las mismas, minimizando el espacio físico ocupado.
- Implementar un módulo para las estadísticas. Se podrían mostrar estadísticas obtenidas al resolver los distintos problemas mediante tablas y gráficas.

## Capítulo 8

# Summary and Conclusions

### 8.1. Optimización de las tareas de una terminal portuaria de contenedores

After studying the state of art, is deducted that management in container port terminal covers a important number of optimization problems. Each terminal have diferent resources and equipment, and the mechanization level varies between terminals. Developing a system to optimize the whole influencing factors wich affects to termininal productivity, is a complex task, because of the casuistry of the terminals placed around the world.

### 8.2. La aplicación

The application allows the study of proposed heuristics to solve BRP, and it is developed in Java, giving the portability to other operating systems. Sp, this application is a starting point to develop a platform to study the problems in the yard of the port container terminals. Watching solutions allows checking the movements of the heuristics.

### 8.3. Resultados

The BRP is a problem wich can be applied to unloading ships, and to extract the containers from the yard. This optimization problem appears in all container terminals. After studying the results, we can say that heuristic which stacks containers on the highest priority containers, are a bad choice, generating very high stacks on containers with a higher priority, resulting this in several relocations of the same container. Furthermore, it has been found the best results are obtained with the heuristics that perform a more equitable distribution of the containers, or stack them on the containers with a lower priority. The heuristic that calculates the average container priority of stacks and select the lowest priority calculated, was the one which has shown better results.

## **8.4. Scope**

Initially, the project consisted in make the graphical interface for displaying resolution of the problems in the container port terminals. To make a first version of the interface, resolution of BRP was included to test how the solutions was played, which joining the development of heuristics have increased significantly the work to done this project.

# Bibliografía

- [1] Jean-Paul Rodrigue, Claude Comtois, and Brian Slack. *The geography of transport systems*, chapter 2 Transportation and the spatial structure, pages 62,63. Routledge, 2013.
- [2] ISO/TC 104/SC 1. Series 1 freight containers classification, dimensions and ratings, August 2013.
- [3] Data World Bank. Data World Bank. <http://data.worldbank.org/indicator/IS.SHP.GOOD.TU>.
- [4] N. A. Harraz M. S. Gheith, A. B. El-Tawil. Container pre-marshalling problem: Review and solution framework. In *The IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, Hong Kong, Feb 2014. Department of Industrial Engineering and Systems Management, Egypt - Japan University of Science and Technology (E-JUST), Alexandria, Egypt.
- [5] Terminalstar.eu. Terminalstar. <http://www.terminalstar.eu/terminalstar.htm>.
- [6] Chuanyu Chen, Wen-Jing Hsu, and Shell-Ying Huang. Simulation and optimization of container yard operations: a survey. In *Proceedings of International Conference on Port and Maritime R and D and Technology*, pages 23–29, 2003.
- [7] Jee Hyun Yang and Kap Hwan Kim. A grouped storage method for minimizing relocations in block stacking systems. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 17(4):453–463, 2006.
- [8] Florian Forster and Andreas Bortfeldt. A tree search procedure for the container relocation problem. *Computers & Operations Research*, 39(2):299–309, 2012.
- [9] Marco Caserta, Stefan Voß, and Moshe Sniedovich. Applying the corridor method to a blocks relocation problem. *OR spectrum*, 33(4):915–929, 2011.
- [10] Raka Jovanovic and Stefan Voß. A chain heuristic for the blocks relocation problem. *Computers & Industrial Engineering*, 75:79–86, 2014.