



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

ADE

Facultad de Administración  
y Dirección de Empresas /UPV

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Facultad de Administración y Dirección de Empresas

Técnicas de Optimización para problemas de  
logística portuaria

Trabajo Fin de Grado

Grado en Administración y Dirección de Empresas

AUTOR/A: Montalvo López, Román

Tutor/a: Vallada Regalado, Eva

Cotutor/a: Villa Juliá, María Fulgencia

Cotutor/a externo: BELENGUER RIBERA, JOSE MANUEL

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023

## RESUMEN

Actualmente la mayor parte del comercio internacional se lleva a cabo por vía marítima, destacando el papel de los puertos como elemento clave en la economía de los países. Sin embargo, el rápido crecimiento de la población ha supuesto un incremento similar en el comercio, y en consecuencia en la actividad portuaria. Por esta razón se ha visto la necesidad de optimizar las tareas que se desarrollan en el día a día de un puerto para sacar el máximo rendimiento a los recursos disponibles de una forma sostenible. Una de esas tareas es organizar la extracción y almacenamiento de contenedores en un patio portuario, la cual representa uno de los mayores cuellos de botella en la actividad diaria de un puerto.

Una buena herramienta que permite solucionar este problema son los modelos matemáticos, los cuales permiten obtener soluciones muy buenas a problemas inabordables únicamente con personas. En este documento se mostrarán distintos modelos matemáticos que afrontan el problema de organización desde distintos ángulos.

El objetivo de este trabajo es diseñar una heurística que permita factibilizar la solución propuesta por un modelo matemático y que, en combinación con este, permita optimizar el orden de las tareas de extracción y almacenamiento de contenedores que se desarrollan en el patio de un puerto. Esto permitirá de incrementar la eficiencia de este proceso gestionando de la mejor forma los recursos disponibles.

**Palabras Clave:** Puerto, Contenedores, Investigación Operativa, Modelos matemáticos, Heurísticas.

## SUMMARY

Today, most international trade is carried out by sea, with ports playing a key role in the economies of countries. However, rapid population growth has meant a similar increase in trade, and consequently in port activity. For this reason, there has been a need to optimise the day-to-day tasks of a port in order to make the best use of the available resources in a sustainable way. One of these tasks is to organise the extraction and storage of containers in a port yard, which represents one of the major bottlenecks in the daily activity of a port.

A good tool to solve this problem is mathematical modelling, which provides great solutions to problems that cannot be solved by humans alone. This paper will show different mathematical models that tackle the organisational problem from different angles.

The aim of this work is to design a heuristic that allows the solution proposed by a mathematical model to be made feasible and, in combination with it, to optimise the order of the container extraction and storage tasks that take place in the yard of a port. This will make it possible to increase the efficiency of this process by managing the available resources in the best possible way.

**Keywords:** Ports, Containers, Operations Research, Mathematical Modelling, Heuristics.

## RESUM

Actualment la major part del comerç internacional es duu a terme per via marítima, destacant el paper dels ports com a element clau en l'economia dels països. No obstant això, el ràpid creixement de la població ha suposat un increment similar en el comerç, i en conseqüència en l'activitat portuària. Per aquesta raó s'ha vist la necessitat d'optimitzar les tasques que es desenvolupen en el dia a dia d'un port per a traure el màxim rendiment als recursos disponibles d'una forma sostenible. Una d'aqueixes tasques és organitzar l'extracció i emmagatzematge de contenidors en un pati portuari, la qual representa un dels majors colls de botella en l'activitat diària d'un port.

Una bona eina que permet solucionar aquest problema són els models matemàtics, els quals permeten obtindre solucions molt bones a problemes inabordables únicament amb persones. En aquest document es mostraran diferents models matemàtics que afronten el problema d'organització des de diferents angles.

L'objectiu d'aquest treball és dissenyar una heurística que permeti \*factibilizar la solució proposada per un model matemàtic i que, en combinació amb aquest, permeti optimitzar l'ordre de les tasques d'extracció i emmagatzematge de contenidors que es desenvolupen al pati d'un port. Això permetrà d'incrementar l'eficiència d'aquest procés gestionant de la millor forma els recursos disponibles.

**Paraules Clau:** Port, Contenedors, Investigació Operativa, Models matemàtics, Heurístiques.



# ÍNDICE

RESUMEN . . . . .	I
SUMMARY . . . . .	II
RESUM . . . . .	III
ÍNDICE DE TABLAS . . . . .	IX
ÍNDICE DE FIGURAS . . . . .	XII
ÍNDICE DE CÓDIGOS . . . . .	XIII
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivos . . . . .	2
1.2. Objetivos de desarrollo sostenible (ODS) . . . . .	2
1.3. Motivación . . . . .	3
1.4. Relación con las asignaturas . . . . .	4
1.5. Estructura del documento . . . . .	4
<b>2. El transporte marítimo</b>	<b>5</b>
2.1. Introducción a transporte marítimo y actividad portuaria . . . . .	5
2.2. Elementos clave para su desarrollo actual . . . . .	6
2.3. Impacto económico en España . . . . .	7
2.4. Valenciaport: Puerto español líder del Mediterráneo . . . . .	9
2.4.1. Plan Estratégico del puerto de Valencia . . . . .	10
2.4.2. Objetivos actuales del Plan Estratégico . . . . .	11
2.4.3. Relevancia del Plan Estratégico para el trabajo . . . . .	11
<b>3. Estructura de la terminal portuaria</b>	<b>13</b>

3.1. La terminal portuaria . . . . .	13
3.1.1. Configuraciones de la terminal . . . . .	14
3.1.2. Terminal del Puerto de Valencia . . . . .	16
3.1.3. Características y elementos de la terminal portuaria de Valencia . . . . .	17
3.1.3.1. Zonas principales . . . . .	18
3.1.3.2. Elementos principales . . . . .	20
<b>4. Optimización Portuaria: El problema de la secuenciación de grúas</b>	<b>25</b>
4.1. Investigación operativa y la optimización portuaria . . . . .	25
4.1.1. Tipos de problemas . . . . .	26
4.2. El problema de secuenciación de grúas . . . . .	27
4.2.1. Descripción del problema . . . . .	27
4.2.2. Datos iniciales del problema . . . . .	28
4.2.3. Métodos para resolver el problema . . . . .	31
4.3. Selección de modelo: El modelo matemático de rutas . . . . .	33
4.3.1. Descripción de las variables del modelo . . . . .	33
4.3.2. Descripción del modelo completo . . . . .	35
4.3.2.1. Desarrollo matemático de las restricciones de cada bloque . . . . .	36
4.3.3. Problemas del modelo matemático . . . . .	39
4.4. Algoritmo heurístico de factibilización . . . . .	41
4.4.1. Metodología y recursos empleados en el desarrollo de la heurística . . . . .	42
4.4.2. Desarrollo del algoritmo heurístico . . . . .	42
4.4.2.1. Reasignación de puntos I/O y espera de los vehículos . . . . .	42
4.5. Resultados del algoritmo . . . . .	46
<b>5. Conclusiones y propuestas de mejora</b>	<b>49</b>
5.1. Conclusiones . . . . .	49
5.2. Propuestas de mejora . . . . .	50
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>51</b>

<b>A. Anexo I: Códigos desarrollados para generar la heurística</b>	<b>53</b>
A.1. Código de acceso . . . . .	53
A.2. Código de carga de datos de las operaciones . . . . .	54
A.3. Códigos de detección y corrección de solape . . . . .	56
A.4. Código que modela todos los elementos empleados en la operación . . . . .	62





# ÍNDICE DE TABLAS

4.2.1.Ejemplo de datos iniciales de un problema . . . . .	30
4.3.1.Datos iniciales de las operaciones . . . . .	40
4.4.1.Datos finales de las operaciones . . . . .	44
4.4.2.Distribución de puntos I/O y grúa en el patio restringido . . . . .	45
4.4.3.Datos iniciales operación restringida . . . . .	45
4.4.4.Distribución de puntos I/O y grúa en el patio restringido . . . . .	45
4.5.1.Comparación de las funciones de coste del modelo simplificado, modelo completo y del algoritmo . . . . .	47



# ÍNDICE DE FIGURAS

2.1.1.Barco de MSC hacia el puerto de Valencia. Fuente: economiadigital.es . . . . .	5
2.2.1.Contenedor para el transporte marítimo. Fuente: MasterLogística.es . . . . .	7
2.3.1.Principales clientes del sector del mar. Fuente [7] . . . . .	8
2.3.2.Efectos en el desarrollo de la economía del transporte marítimo. Fuente [7] . . . . .	9
2.4.1.Impacto económico del puerto de Valencia . . . . .	10
2.4.2.Valenciaport en su Plan Estratégico 2030. Fuente: valenciaport.es . . . . .	11
3.1.1.Zonas principales de la terminal portuaria . . . . .	13
3.1.2.Terminal presentes en el puerto de Valencia . . . . .	14
3.1.3.Configuración asiática (izqda.) frente a la configuración europea (dcha.) . . . . .	15
3.1.4.Estructura la terminal portuaria de Shanghai con configuración asiática. Fuente: cronista.com . . . . .	16
3.1.5.Ubicación de la nueva terminal portuaria de Valencia. Fuente: valenciaport.es . . . . .	17
3.1.6.Estructura de un patio europeo con sus zonas principales: El seaside en la parte superior, el landside en la parte inferior, el patio de almacenamiento entre ambas ubicaciones y los puntos I/O como conexiones entre seaside y landside con el patio. . . . .	18
3.1.7.Conjunto de bloques de una terminal . . . . .	19
3.1.8.Sistema de apilamiento de contenedores en los bloques . . . . .	19
3.1.9.Straddle Carrier . . . . .	21
3.1.10Vehículos de guiado automático o AGVs . . . . .	21
3.1.11Grúa de muelle o Quay Crane en la izquierda y grúa de almacenamiento automáti- co o Yard Crane en la derecha . . . . .	22
3.1.12Estructura de un patio con configuración europea de la terminal portuaria del Puerto de Valencia. Fuente: soa.itl.es . . . . .	23

4.2.1.Estructura de un patio con configuración europea que servirá como referencia para los elementos del problema . . . . .	27
4.2.2.Vista superior de la estructura de un patio estándar de 10 filas y 42 bahías, cono los puntos I/O ubicados a los laterales . . . . .	31
4.3.1.Esquema de la solución del modelo matemático para los datos del ejemplo . . . .	41
4.4.1.Esquema de la operación de corregida de la instancia <b>E_R1_S_NC5_1</b> . . . . .	44
4.4.2.Esquema de la operación con patio restringido de la instancia <b>E_R1_ST_NC5_1</b>	46

# ÍNDICE DE CÓDIGOS

A.1.1Código principal para acceder a los algoritmos de resolución y carga de datos . . .	53
A.2.1Código para procesar y almacenar los datos de las operaciones . . . . .	55
A.3.1Código principal para comprobar el solape de la solución . . . . .	56
A.3.2Métodos auxiliares empleados en el proceso de corrección del solape . . . . .	61
A.4.1Código de los elementos empleados en el algoritmo . . . . .	65
A.4.2Modificación principal en el código para añadir los tiempos de espera en puntos I/O . . . . .	65



# Capítulo 1

## INTRODUCCIÓN

El sector marítimo tiene un papel fundamental en el desarrollo de la economía en nuestro país. Esto se debe tanto a la importancia que supone para el comercio internacional como a la ventaja geográfica que presenta el territorio español para llevar a cabo esta actividad, ya que España cuenta con 4.872 kilómetros de costa [7] en el territorio peninsular a los cuales hay que añadir las zonas costeras de los archipiélagos balear y canario y las regiones de Ceuta y Melilla. Esta ventaja estratégica ha propiciado el desarrollo del sector del mar en nuestro país, estableciéndose como fuente fundamental de la riqueza que se genera en España desde la antigüedad.

Uno de las actividades más importantes del sector marítimo es el transporte marítimo, actividad comercial que cuenta con los puertos como elemento clave para su funcionamiento. Los puertos españoles son reconocidos internacionalmente, situando a España como una gran potencia en el comercio marítimo, y por ello es necesario que la actividad portuaria se desarrolle de manera eficaz y sostenible. En particular, Valencia es una de las provincias más importantes de nuestro país en este sector debido a su posición estratégica privilegiada y su alto prestigio internacional, destacando el papel de la entidad gestora de la red portuaria Valenciana, llamada Valenciaport, en este éxito.

De manera recurrente las entidades que dirigen Valenciaport se reúnen para establecer el llamado Plan Estratégico, documento que resume el conjunto de acciones que se aplicarán durante un intervalo de tiempo fijado en los puertos agrupados dentro de Valenciaport, como son el Puerto de Sagunto, el Puerto de Gandía y el Puerto de Valencia, para cumplir con una serie de objetivos establecidos relacionados con aspectos como el desarrollo económico o la sostenibilidad.

Recientemente la estrategia desarrollada por ValenciaPort en este plan para mejorar el Puerto de Valencia ha implicado la creación de una nueva terminal portuaria, que está todavía en desarrollo, y cuya nueva configuración promete un alto rendimiento y beneficio económico a pesar de conllevar un incremento considerable en la complejidad de las operaciones. Esta situación ha centrado la atención de los directivos de la entidad en la optimización de los procesos que ocurren en el día a día de un puerto, destacando principalmente el proceso de secuenciación de las operaciones que realiza una grúa para el almacenamiento y la extracción de los contenedores en el patio de la terminal portuaria. Este proceso supone el principal cuello de botella en la actividad, ya que el patio de una terminal es el punto por donde pasan todos los contenedores que se procesan en el día a día. Por esta razón el problema de secuenciación de grúas es un problema crítico que se ha de resolver para asegurar el buen funcionamiento de la terminal y así maximizar los beneficios obtenidos con la actividad.

Una de las disciplinas que permiten afrontar este problema es la investigación operativa, discipli-



na que se encarga de desarrollar y aplicar métodos analíticos para la toma de decisiones. Debido a la importancia de esta nueva terminal para la Comunidad Valenciana se ha decidido afrontar este problema en la secuenciación de grúas empleando métodos de investigación operativa, para ofrecer a la nueva terminal una herramienta que permita maximizar su potencial en la actividad comercial marítima de nuestra región.

### 1.1. Objetivos

El objetivo principal de este Trabajo de Final de Grado será desarrollar un método para solucionar el problema de secuenciación de grúas presente en la nueva terminal portuaria que se construirá en el Puerto de Valencia. Este trabajo supone un reto porque se aplica directamente a un problema real de gran importancia en nuestro entorno cercano, y cuyo efecto puede repercutir enormemente en el rendimiento y la eficiencia de la nueva terminal portuaria que está por construirse.

Otros objetivos complementarios a este serán por un lado presentar el sector del transporte marítimo y la terminal portuaria y destacar su importancia en el desarrollo de la economía valenciana, y por otro lado resaltar el papel de la investigación operativa en el desarrollo de soluciones a problemas complejos y cruciales en nuestro entorno cercano.

Para conseguir estos objetivos se han desarrollado los siguientes puntos en la planificación del trabajo:

- Analizar la historia e importancia del transporte marítimo para la economía, y destacar el papel de los Puertos Valencianos en el desarrollo económico del país.
- Estudiar los principales elementos de una terminal portuaria y su papel fundamental en el desarrollo del transporte marítimo, centrándose en la terminal portuaria que se construirá en el Puerto de Valencia.
- Introducir el campo de la optimización portuaria y definir el problema de secuenciación de grúas como problema principal a solucionar.
- Presentar una solución al problema de secuenciación de grúas de la terminal empleando herramientas de investigación operativa, como pueden ser los modelos matemáticos y las heurísticas, y explicar los fundamentos de la solución propuesta.
- Extraer las conclusiones del trabajo que permitan evaluar los resultados de la solución desarrollada y comprobar su posible aplicación en la nueva terminal que está por construirse.
- Establecer propuestas de mejora alineadas con la optimización de la nueva terminal portuaria que está por construirse.

### 1.2. Objetivos de desarrollo sostenible (ODS)

Los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) fueron adoptados por las Naciones Unidas en 2015 para acabar con grandes problemas actuales del planeta y asegurar que para 2030 las condiciones generales de desarrollo económico, situación social y condiciones medioambientales sean adecuadas para todo el mundo y las personas puedan gozar de paz y prosperidad [16].

El comercio y transporte marítimo junto a la actividad portuaria son dos sectores que a pesar de tener un gran impacto en la economía y riqueza de los países generan un impacto igualmente alto en el medioambiente, derivado de la maquinaria, vehículos y materiales empleados durante la actividad portuaria y el transporte entre países [17]. Debido a la importancia de este asunto, países como el nuestro están desarrollando planes de contingencia para reducir el impacto de estas actividades en el entorno y a su vez mantener la productividad [14]. Otra forma menos drástica de afrontar este problema es optimizando la propia actividad que se desarrolla en el puerto, que es el tema principal que se trata en este trabajo. Esto implica una disminución de los costes derivados de la actividad y los recursos empleados, con una reducción directa en el impacto medioambiental.

En particular la optimización portuaria permite afrontar los siguientes objetivos:

- **ODS 9: Industria, Innovación e Infraestructura.** Ya que el transporte marítimo es uno de los sectores que mayor riqueza generan a los países es fundamental producir avances tecnológicos y mejoras en el desarrollo y la gestión de la actividad, para producir incrementos en la productividad de la mano de mejoras en la sostenibilidad de la actividad. Los métodos de optimización permiten mejorar el desarrollo de la actividad reduciendo los recursos empleados.
- **ODS 13: Acción por el clima.** Los problemas de alta complejidad como el que se trata en este trabajo suelen conllevar un gran consumo de recursos y una gestión ineficiente de los mismos, lo que afecta de manera directa a los residuos generados en los patios portuarios donde se desarrolla la actividad. Al optimizar la actividad portuaria se reduce drásticamente las operaciones que deben realizar los equipos y el consumo de energía o recursos empleado por parte de estos, lo que permitiría reducir enormemente el impacto medioambiental que genera la actividad.
- **ODS 14: Vida submarina.** La actividad portuaria afecta de manera directa a la vida submarina, por lo que para reducir el impacto en dicho ecosistema y es importante implementar prácticas sostenibles en la actividad portuaria. En concreto mediante los algoritmos propuestos se podrá reducir los recursos empleados y los deshechos generados, además de que los barcos podrán permanecer menos tiempo en los puertos y zonas costeras debido a una gestión más eficiente de la actividad, reduciendo así las perturbaciones que se producen en el ecosistema marino.

### 1.3. Motivación

Debido a la importancia de este sector en nuestro país, y particularmente para la Comunidad Valenciana, la motivación principal de este Trabajo de Final de Grado es servir como culminación de los estudios realizados en el Grado de Administración y Dirección de empresas, empleando todos los conocimientos adquiridos durante estos años para dar solución a un problema real y cercano a nosotros como es el problema de secuenciación de grúas para la nueva terminal portuaria que se va a construir en el Puerto de Valencia, ayudado por profesionales del sector en optimización y empleando herramientas tecnológicas sofisticadas para ello.

Otra motivación de este trabajo consiste en aplicar los conocimientos adquiridos en la carrera para exponer la importancia y el valor de la actividad portuaria en la economía de los países, destacando su importancia para el crecimiento económico nacional y resaltando el papel de la Comunidad Valenciana como un gran contribuyente a este sector en el ámbito nacional .

## 1.4. Relación con las asignaturas

Este trabajo contiene gran parte del conocimiento adquirido en el grado de Administración y Dirección de empresas, por ello es importante mencionar las asignaturas que tienen relación y han contribuido al desarrollo del trabajo.

**Economía Española y Economía Mundial.** Importancia del comercio marítimo como factor de crecimiento económico de los países, destacando España y Valencia como parte clave en el éxito de este sector.

**Métodos Estadísticos en Economía.** Aprendizaje y manejo del lenguaje de programación R, el cual no se ha empleado directamente en el trabajo, pero varios conceptos del lenguaje han sido útiles para la comprensión y aprendizaje del lenguaje de programación Python, la herramienta principal empleada para desarrollar la solución al problema de secuenciación de grúas.

**Investigación Operativa.** Aprendizaje de métodos para dar soluciones analíticas que apoyen la toma de decisiones. Profundización en técnicas avanzadas de optimización empleando modelos matemáticos y desarrollo de los conocimientos adquiridos en heurísticas como método para obtener soluciones excelentes ahorrando tiempo.

## 1.5. Estructura del documento

Este documento resumen de mi Trabajo de Final de Grado se organiza en capítulos cuyos contenidos se enuncian a continuación para ofrecer un esquema general de lo que se verá en la memoria. Estos capítulos también se presentan en el índice del documento.

El **Capítulo 1** introduce el tema de los puertos y el transporte marítimo y muestra los objetivos y motivación del trabajo, así como la relación con las asignaturas cursadas durante el grado.

El **Capítulo 2** resume la historia y evolución del transporte marítimo, su importancia en el desarrollo de las distintas culturas y su papel en el desarrollo económico de los países. También se muestra una imagen de la situación actual del sector en España destacando el papel de Valencia en esta actividad.

El **Capítulo 3** muestra el esquema general de una terminal portuaria como la que se va a desarrollar en el Puerto de Valencia, así como los elementos y ubicaciones más importantes que ayudan en el desarrollo de la actividad diaria en esta zona del puerto.

El **Capítulo 4** introduce el campo de la optimización portuaria y el problema de la secuenciación de grúas. También muestra y explica la solución adoptada a este problema a partir de ejemplos.

El **Capítulo 5** presenta la revisión bibliográfica realizada para el desarrollo del trabajo.

El **Capítulo 6** expone las conclusiones obtenidas y establece posibles líneas de trabajo que empleen la solución desarrollada como base.

## Capítulo 2

# El transporte marítimo

En este capítulo se expone la importancia del transporte marítimo en la economía. Su propósito es realizar una visión general de las características y situación del sector en España en la actualidad. También se muestra la importancia del trabajo realizado apoyándose en la estrategia que están desarrollando los puertos valencianos para mejorar su productividad en el sector.

### 2.1. Introducción a transporte marítimo y actividad portuaria

El transporte marítimo es la actividad que comprende el transporte de mercancías por vía marítima, y forma a día de hoy la principal vía de comercio internacional. La presencia del transporte marítimo ha sido relevante desde la antigüedad, ya que las primeras formas de transporte marítimo están registradas por el 3500 a.C. [6], relacionadas con el transporte de pequeñas cantidades de recursos y tripulantes entre rutas costeras. Esta actividad ha dando una gran ventaja estratégica a aquellas civilizaciones que lograban situarse cerca de grandes ríos, mares y océanos, y su efecto se sigue observando hoy en día. Esto se debe a que las grandes extensiones de agua permiten disponer de un entorno de gran capacidad para albergar elementos de transporte y una amplia variedad de rutas de comercio con las que explorar y acceder a zonas remotas, obtener recursos naturales y transportar materiales a todas las partes del planeta, aspecto crucial en un mundo cada vez más globalizado.



Figura 2.1.1: Barco de MSC hacia el puerto de Valencia. Fuente: economiadigital.es

En el transporte marítimo destaca el puerto como elemento clave de la actividad. Una de las

definiciones de puerto marítimo indica que un puerto marítimo es un nodo logístico e industrial en las cadenas mundiales de suministro, con un marcado carácter marítimo y una agrupación funcional y espacial de actividades relacionadas directa o indirectamente con el transporte, la transformación y los procesos de información dentro de las cadenas de suministro [12]. Esta definición remarca el carácter global de la actividad portuaria y saca a relucir el papel del puerto en el comercio mundial, ya que en la mayor parte de las actividades comerciales internacionales el puerto es el nexo de unión entre el transporte marítimo y las vías de transporte terrestre en los países que participan en dicha actividad. Por esta razón el puerto es el elemento clave que permite hacer del transporte marítimo el sector tan relevante que conocemos hoy en día.

## 2.2. Elementos clave para su desarrollo actual

A principios del siglo XX se produjo una rápida expansión de la industrialización en Europa y Norte América. Esta revolución industrial desencadenó un incremento en la capacidad de producción, un elevado crecimiento económico y una necesidad creciente de materias primas y mercados. Para apoyar el potencial de la industria, en un entorno donde el comercio internacional estaba aumentando, era necesario disponer de una vía de transporte segura y eficiente que permitiese transportar grandes cantidades de productos a lo largo de grandes distancias.

Es por esta razón que el transporte marítimo ha experimentado un punto álgido en su desarrollo en tiempos contemporáneos, sobre todo en esta época [10]. Además de coincidir con esta situación económica global, su desarrollo fue impulsado por diversos factores e innovaciones tecnológicas que ocurrieron simultáneamente y que han contribuido a su rápido crecimiento. Según diversos estudios y fuentes [2] se pueden identificar algunas de las principales causas que han influido en su desarrollo:

- **Expansión del comercio internacional:** El final de la Segunda Guerra Mundial significó una etapa crucial para el comercio y transporte marítimo. La situación tras este acontecimiento dio lugar a una creciente demanda de bienes y materias primas a nivel global, de la mano del desarrollo económico de Estados Unidos y la reconstrucción de Europa tras la guerra. El transporte marítimo fue el medio principal para transportar grandes cantidades de mercancía de manera efectiva y económica a países de todo el mundo, por lo que se produjo un amplio desarrollo en este sector durante esa época.
- **Avances tecnológicos:** El transporte marítimo se ha beneficiado de avances tecnológicos significativos. Uno de los hitos clave en la historia del transporte marítimo fue la introducción de los **contenedores** en la década de 1950. El contenedor surgió en dicha época gracias a la contribución del camionero americano Malcom McLeelan, que durante sus travesías en camión cerca de las costas de Estados Unidos vio que los puertos americanos estaban saturados debido a la lentitud en la descarga y desplazamiento de las mercancías a los barcos. Por esta razón decidió que sería más práctico depositar los remolques de sus camiones directamente en los puertos para su almacenamiento en los barcos [3], que ya contenían toda la mercancía en un espacio mucho más compacto. Aunque este nuevo sistema era mucho más rápido y eficaz que los métodos anteriores, el remolque de los camiones ocupaba bastante espacio en comparación a la cantidad de mercancía que contenía, debido a su naturaleza previa de transporte por carretera. En la carretera se requería de un entorno para las mercancías mucho más robusto y seguro, y en el que el espacio no era tan crucial, por lo que los remolques para camiones cuentan con una pared más gruesa y diversos elementos de adaptación a los camiones que podrían eliminarse para el transporte marítimo y así dedicar más espacio para el transporte de mercancías. Tras eliminar la parte interna

del remolque y otras estructuras no tan necesarias para el transporte marítimo surgió el concepto de contenedor que conocemos hoy en día, que es el que muestra la figura 2.2.1.

Las características principales de los contenedores, que han hecho de esta tecnología el factor más relevante en el crecimiento del transporte marítimo, son **el incremento en la eficiencia y velocidad** debido a la simplificación en el proceso de carga y descarga, además de una reducción en el tiempo de manejo de mercancías, la **estandarización** de los contenedores de 20 pies de alto y 40 pies de largo para adoptar unas dimensiones fijas internacionalmente y optimizar el espacio disponible en puertos y barcos, la **reducción en los costes** en el proceso total de transporte y el **incremento de la seguridad** de las mercancías transportadas, que en conjunto han convertido la actividad en un proceso más ágil y eficiente.



Figura 2.2.1: Contenedor para el transporte marítimo. Fuente: MasterLogística.es

Todos estos elementos han desencadenado un cambio en la morfología de los puertos y los elementos implicados en el transporte marítimo, que junto a las mejoras tecnológicas en la construcción de buques, la navegación y los sistemas de comunicación han revolucionado la totalidad de este sector.

- **Globalización de la economía:** La creciente interconexión de las economías a nivel global ha impulsado el transporte marítimo. La globalización ha llevado a un aumento en el comercio entre países y continentes, creando una demanda cada vez mayor de transporte marítimo. Además, la fragmentación de la producción y la especialización regional han llevado a la necesidad de movilizar mercancías en grandes cantidades y a largas distancias, lo que ha potenciado el papel central del transporte marítimo en la cadena de suministro global.

### 2.3. Impacto económico en España

En España el sector del transporte marítimo toma un papel fundamental para promover el crecimiento económico del país. Debido a la privilegiada posición geográfica que ocupa, su desarrollada infraestructura portuaria y la robusta red logística que presenta, España es un país que goza de una situación muy favorable para desarrollar la actividad marítima, convirtiéndola en una pieza clave para el comercio internacional.

En cuanto al aspecto geográfico, los puertos españoles son de particular interés para el transporte marítimo porque actúan como nexo de unión entre África, América y Europa, debido a su papel

como enlace entre el Mar Mediterráneo y el Océano Atlántico. Además el país posee alrededor de 8000km de costa que facilitan enormemente el desarrollo de la actividad.

Respecto a la **infraestructura marítima**, España cuenta con una gran cantidad de puertos y terminales en todo el país. Puertos españoles de renombre internacional como los de Algeciras, Barcelona, Bilbao o Valencia poseen instalaciones de alto nivel, segmentando las terminales en función del tipo de material que se transporta en los contenedores, y disponen de sistemas logísticos de alta eficiencia y un avanzado manejo del transporte de contenedores entre barcos y terminales, lo que garantiza el elevado rendimiento de las operaciones que se realizan.

En cuanto a la **red logística**, el sector del transporte marítimo español se apoya de la gran red de transporte por carretera y raíl que dispone el país. Esta conexión entre distintos modos de transporte, referida habitualmente como conexión intermodal, permite potenciar el comercio con regiones de Europa que no poseen conexión comercial por vía marítima, o cuyas redes portuarias no son tan potentes como las presentes en territorio español.

Combinando todos estos factores que impulsan esta actividad económica con los más de 7000 millones de toneladas que mueven al año y los elevados porcentajes de importaciones y exportaciones que se desarrollan por esta vía, siendo de un 80 % y un 50 % respectivamente, los puertos españoles han consolidado su lugar entre los mejores en el ámbito Europeo y mundial [15] [8].

Estos hechos se reflejan en el análisis realizado en [7], donde se puede apreciar los principales sectores beneficiados del transporte marítimo y los efectos en el PIB y el empleo en España. Se puede ver en la figura 2.3.1 que una gran variedad de sectores requieren del transporte marítimo para sus actividades, destacando los servicios anexos al transporte, el sector del mar, el transporte terrestre y otras actividades empresariales.

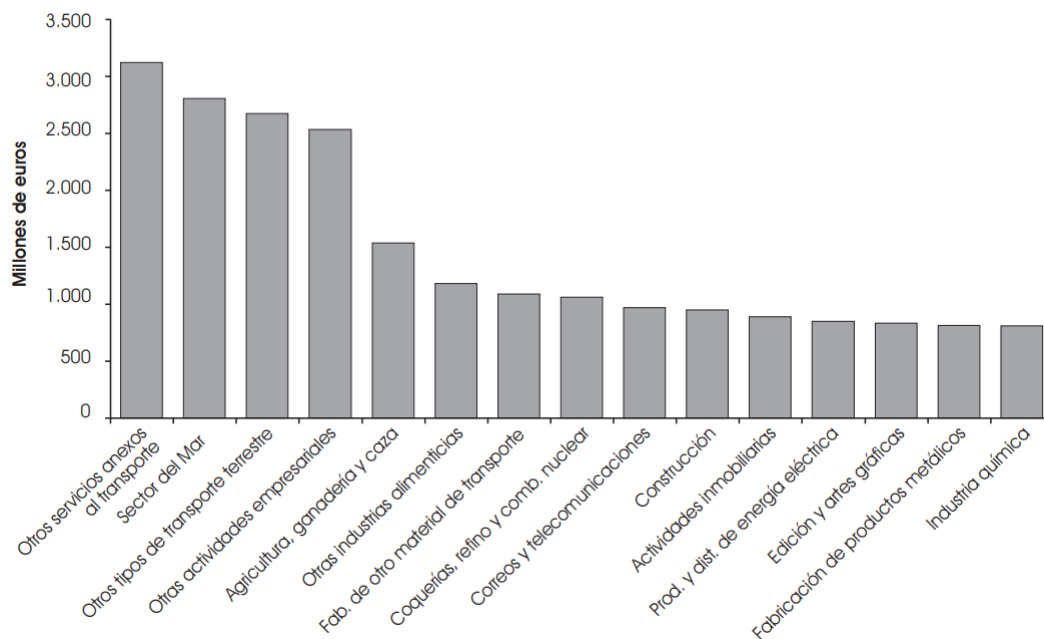


Figura 2.3.1: Principales clientes del sector del mar. Fuente [7]

Además del dinero que se genera en todos estos sectores, en la figura 2.3.2 se pueden apreciar los datos asociados al sector del mar en 2019, donde se destacan otros factores de interés para una actividad económica, como pueden ser el empleo o el Valor Añadido Bruto. Aquí se aprecia

que dentro del sector del mar la actividad portuaria destaca enormemente como principal contribuyente al Valor Añadido Bruto y respecto a otras actividades. Todas estas cifras sirven para reafirmar la fuerte posición de España en el sector marítimo, indicando el futuro prometedor del país como potencia en este campo.

Sectores	VAB (millones de euros)	Empleo (miles de personas)	Peso en el VAB (%)	Peso en el empleo (%)	Multiplicador VAB	Multiplicador empleo
<b>Total Sector del Mar</b>	<b>26.873</b>	<b>462</b>	<b>2,8</b>	<b>2,3</b>	<b>2,5</b>	<b>2,8</b>
Pesca	1.693	45	0,2	0,2	2,0	1,7
Construcción naval	844	39	0,1	0,2	4,7	2,5
Transporte marítimo	1.129	13	0,1	0,1	3,0	3,9
Náutica de recreo	1.079	16	0,1	0,1	5,3	6,7
Industria auxiliar	3.099	45	0,3	0,2	3,8	4,9
Investigación marina	392	9	0,04	0,04	2,6	2,5
Turismo marítimo	3.303	62	0,3	0,3	2,6	2,7
Puertos	9.366	94	1,0	0,5	1,91	2,77
Armada	704	26	0,07	0,13	2,31	1,80
Comercio y distribución	2.938	52	0,3	0,3	-	-
Seguros y banca	1.734	17	0,2	0,1	-	-
Otras actividades	593	43	0,1	0,2	-	-

Figura 2.3.2: Efectos en el desarrollo de la economía del transporte marítimo. Fuente [7]

Como se ha comentado en párrafos anteriores, una de las mayores partícipes en estos resultados es la Comunidad Valenciana, concretamente Valencia, gracias a sus puertos agrupados bajo la entidad conocida como Valenciaport. Esta red portuaria será el terreno sobre el que se desarrollará el resto del trabajo.

## 2.4. Valenciaport: Puerto español líder del Mediterráneo

Valenciaport es la entidad portuaria española líder del Mediterráneo en transporte de mercancías en contenedor. Esta entidad recoge los puertos españoles de Valencia, Sagunto y Gandía, tres puertos de prestigio debido a su privilegiada ubicación geográfica, la gran cantidad de conexiones con puertos de renombre a nivel mundial y el reconocimiento internacional del que dispone gracias a tantos años de resultados exitosos y cifras extraordinarias.

La importancia de su posición radica en que es el principal puerto de interconexión en transportes interoceánicos, conectando el eje Suez-Gibraltar que da acceso al Mar Atlántico con el Mediterráneo Occidental, además de su área de influencia en territorios del Sur de Europa y el Norte de África, gracias a la capacidad de transporte por carretera y ferrocarril que dispone la comunidad y la proximidad geográfica respecto al continente africano.

Para resaltar la importancia del puerto de Valencia se analiza el último estudio de impacto económico realizado por los profesionales de Valenciaport. Estos estudios se realizan de manera periódica para comprobar la eficacia de los objetivos establecidos tras el Plan Estratégico elaborado para un periodo, concepto que se verá en la siguiente sección. Este informe recoge los efectos de la actividad en factores como los salarios, el beneficio bruto, ingresos fiscales, Valor Añadido Bruto y empleo.



Impacto económico obtenido por la actividad del Puerto de Valencia (miles €):

	Inicial	Directo	Indirecto	Inducido	Totales	Total+ Inicial
Salarios Brutos	378.525	428.816	94.629	273.880	797.325	1.175.850
Beneficio Bruto	262.532	386.135	90.364	262.158	738.657	1.001.189
Ingresos Fiscales	-9.647	92.633	23.396	65.807	181.836	172.189
VABpm	631.410	907.584	208.389	601.845	1.717.818	2.349.228
Empleos*	6.892	15.460	3.632	10.757	29.849	36.741

Figura 2.4.1: Impacto económico del puerto de Valencia

En la figura 2.4.1 se pueden ver los datos asociados al impacto económico del puerto de Valencia en exclusiva. Hay que recordar que la entidad de Valenciaport comprende además los puertos de Sagunto y Gandía, los cuales en su conjunto generaron un Valor Añadido Bruto del orden de 2500 millones de euros en 2016, lo cual representa el 2,39 % del VAB de la Comunidad Valenciana.

### 2.4.1. Plan Estratégico del puerto de Valencia

Con el objetivo de mantenerse entre los mejores puertos europeos y a nivel mundial, Valenciaport está sometida a un proceso constante de cambio, adaptación y mejora continua que le permite renovarse y mantenerse a la altura de los mejores estándares de calidad en transporte marítimo. Este proceso de adaptación se realiza periódicamente mediante el denominado Plan Estratégico, que es un documento que recoge una serie de cambios que deben realizarse para hacer frente a los retos que plantea el escenario económico actual.

Históricamente Valenciaport siempre ha logrado satisfacer los requerimientos establecidos en sus planes estratégicos. Un ejemplo de esto es que en 2010 se alcanzaron las cifras de comercio establecidas en el Plan Estratégico con horizonte en 2015, comerciando un total de 4,2 millones de TEU cuando estaban previstas unas 4 millones para 2015. TEU es la medida fundamental en el transporte marítimo, y equivale a la cantidad de mercancía que se puede transportar en un contenedor estándar de 20 pies. Esto lejos de ser una predicción pobre por parte de los analistas de la entidad, demuestra que la capacidad de desarrollo y evolución de los puertos Valencianos supera con creces las expectativas de los profesionales más expertos.

Cada uno de los planes estratégicos más recientes ha estado centrado en un concepto concreto derivado de la situación económica en la que se elaboraban y para su composición se emplea una metodología dividida en 4 fases diferenciadas que permiten realizar una evaluación de la situación actual del sector, elaborar una estrategia alrededor de dicha evaluación en la que contribuyen todas las entidades que intervienen en la actividad, proponer acciones para llevar a cabo el plan y proceder con la implementación. Todo esto para elaborar la imagen que se desea para los puertos de Valenciaport en los años venideros, como se ve en la figura 3.1.5.



Figura 2.4.2: Valenciaport en su Plan Estratégico 2030. Fuente: valenciaport.es

## 2.4.2. Objetivos actuales del Plan Estratégico

Atendiendo a los resultados presentados en la sección anterior vemos que el objetivo fundamental del Plan Estratégico de horizonte 2015 fue aprovechar el panorama económico creciente para incrementar las cifras de comercio realizadas en la actividad de los puertos. Tras la crisis que sufrió el país por aquellos años, el Plan Estratégico 2020 se centró en consolidar la posición de Valenciaport en sector del transporte marítimo para reducir el impacto de la crisis. Esto supuso un cambio en la estrategia centrado en aspectos como la sostenibilidad, mantenimiento de la rentabilidad, reducción de costes y mejora de la eficiencia. Estos objetivos se conservan en el Plan Estratégico actual con horizonte 2030 y se complementan con otros alineados con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, desarrollados en los 5 pilares del Plan Estratégico actual que definen cómo deberían ser los puertos valencianos a futuro. Estos pilares son Dinamización del Ecosistema, Sostenibilidad Ambiental y Resiliencia, Liderazgo en Digitalización e Innovación, Generación de Valor para las personas y Referentes en Gestión asegurando el interés general.

## 2.4.3. Relevancia del Plan Estratégico para el trabajo

Una de las piezas clave en el Plan Estratégico que se ha desarrollado para el 2030 es la **construcción de una nueva terminal portuaria** en el Puerto de Valencia que se alinee con los objetivos del plan y que sirva como desencadenante para la adaptación de las terminales españolas a los nuevos estándares. Esta nueva terminal posee una nueva configuración, distinta a las existentes actualmente en el puerto, que permite maximizar la eficiencia y la sostenibilidad en las actividades. Todas las configuraciones presentes en el puerto se explican con detalle en el capítulo 3 de esta memoria.

El fundamento principal de este trabajo reside en desarrollar una solución que permita alinearse con los pilares establecidos para el Plan Estratégico 2030 durante la etapa de formulación estratégica, centrándose principalmente en mejorar la logística de esta nueva terminal portuaria que se va a construir aplicando técnicas de investigación operativa aplicadas a la optimización portuaria.

Por un lado el punto clave serán los aspectos de reducción de costes, mejora de la eficiencia y sostenibilidad económica, ya que los métodos de optimización son herramientas que permiten incidir en problemas logísticos de alta complejidad de una manera sencilla y sin recurrir a elevados gastos para su desarrollo, suponiendo una reducción considerable del coste y la complejidad en el desarrollo de las operaciones portuarias. Además, emplear este tipo de soluciones tecnológicas incide directamente en el pilar de Liderazgo en Digitalización e Innovación gracias a la automatización mediante software de un problema recurrente en la actividad portuaria.

Por otro lado, la solución aportada apoya directamente en el especial énfasis que hace el Plan Estratégico de 2030 en los Objetivos de Desarrollo Sostenible con el pilar de Sostenibilidad Ambiental y Resiliencia, ya que las implementaciones en software de problemas habituales surgen como una alternativa mucho más sostenible y que emplea menos recursos que los métodos tradicionales de operaciones y logística portuaria. Además al optimizar las operaciones se reduce de manera drástica la actividad realizada por maquinaria y otros elementos causantes de generar residuos tóxicos y consumir elevadas cantidades de energía.

Todo esto se consigue mediante la automatización de uno de los procesos más importantes de la actividad portuaria, que es la gestión en el almacenamiento y la extracción de contenedores. Anteriormente la mayor parte de las tareas se realizaban manualmente, implicando altos costes y una mayor lentitud. En la nueva configuración de la terminal portuaria se favorece mucho la automatización, por lo que la solución que se va a proponer, que combina herramientas de investigación operativa y su aplicación directa en un software, permitirá automatizar este proceso clave en la actividad, ganando en rapidez y reducción de costes. Además esta solución permitirá ir actualizando constantemente las operaciones de almacenamiento y extracción que deben realizarse, lo que aporta un alto grado de flexibilidad al desarrollo de este proceso.

## Capítulo 3

# Estructura de la terminal portuaria

En este capítulo se presenta la terminal portuaria, que es el entorno en el que se desarrolla la actividad principal de un puerto, y sus elementos fundamentales. Se centrará principalmente en la estructura de la terminal portuaria que se desarrollará en el puerto de Valencia.

### 3.1. La terminal portuaria

Las terminales portuarias son puntos vitales en la cadena logística global y desempeñan un papel crucial en el transporte marítimo. Estas instalaciones funcionan como punto de interconexión entre los diferentes modos de transporte, donde los barcos, camiones y trenes convergen para mover mercancías de manera eficiente y segura entre países. Una terminal portuaria es mucho más que un simple lugar de embarque y desembarque de mercancías, ya que es una compleja infraestructura compuesta por diversas zonas y elementos que garantizan el flujo continuo de bienes y servicios a lo largo de toda la actividad. Hay tres zonas principales, área de operaciones marítimas, patio de contenedores o almacenamiento y área de operaciones terrestres como puede verse en la figura 3.1.1. La zona principal en la que se desarrolla el problema que se va a resolver, que es la secuenciación de las grúas de patio para realizar operaciones de almacenamiento y extracción de contenedores, sucede principalmente en el patio de contenedores, por lo que esta zona en particular se desarrollará más adelante con sus características y componentes.

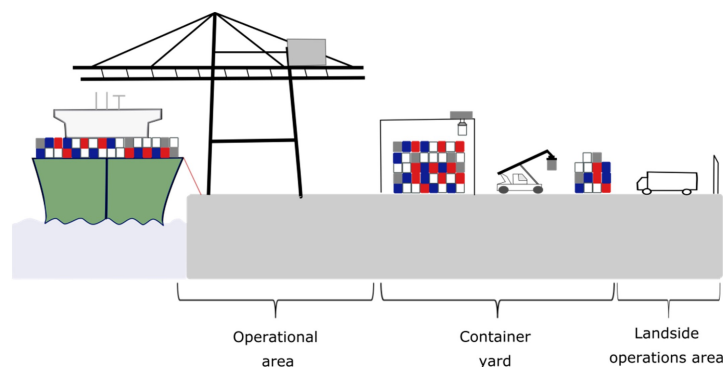


Figura 3.1.1: Zonas principales de la terminal portuaria

Los puertos son zonas complejas y por lo general incluyen como mínimo una terminal, pero en función de la magnitud y variedad de las tareas que se desarrollan pueden haber más terminales

y de varios tipos. Esto se debe a que una terminal está asociada con una concesión, y una naviera tiene permiso para explotar dicha terminal durante el periodo que dura la concesión. El Puerto de Valencia tiene las terminales que se ven en la figura 3.1.2 y una de las compañías que utiliza terminales del Puerto de Valencia es COSCO (China Ocean Shipping Company).

En la actualidad no existe un modelo único de terminal portuaria, ya que cada puerto tiene su propia estructura y sistema organizativo que permite desarrollar la actividad de formas diferentes y más o menos eficientes, y estas configuraciones dependen de cómo se estructuran las zonas principales que se han mencionado en la anterior sección. Los principales tipos de terminal se clasifican según la actividad principal que se desarrolla [12], como carga general, carga a granel o transporte de pasajeros, siendo las terminales de carga el enfoque principal de este trabajo.



Figura 3.1.2: Terminales presentes en el puerto de Valencia

#### 3.1.1. Configuraciones de la terminal

En este trabajo se ha enfocado principalmente en el modelo de terminal característico de la nueva terminal portuaria que se va a desarrollar en el Puerto de Valencia, por lo que es importante entender los elementos y zonas principales que contribuyen a la actividad en esta región del puerto.

Históricamente las terminales portuarias del Puerto de Valencia han presentado un esquema de terminal con configuración de tipo asiática, mientras que las terminales de contenedores más automatizadas están adoptando una configuración de tipo europea, que aporta una productividad y sostenibilidad mayores que la asiática a costa de incrementar la complejidad de sus operaciones.

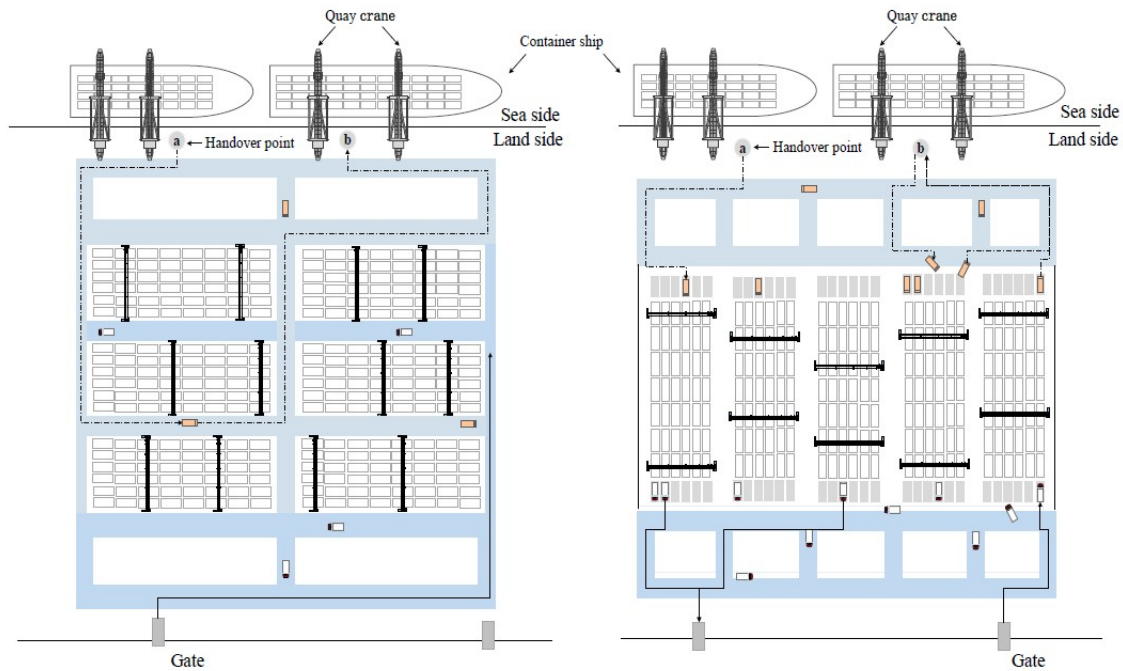


Figura 3.1.3: Configuración asiática (izqda.) frente a la configuración europea (dcha.)

La **configuración asiática**, presente en puertos de prestigio como el de Singapur, el de Shanghai (que figura en la imagen 3.1.4) o el de Klan se caracterizan por disponer de áreas extensas para almacenar los contenedores y permitir un apilado y maniobrabilidad eficientes. Estas áreas de almacenamiento están dispuestas de manera paralela a la zona portuaria como puede apreciarse en la estructura de la izquierda de la figura 3.1.3 y se dividen en bloques de apilado de contenedores. En este caso la terminal de configuración asiática consta de 6 bloques de almacenamiento como se puede ver en la imagen 3.1.3.

El procedimiento habitual en este tipo de configuraciones es que las grúas de los muelles, o Quay Cranes, extraigan los contenedores de los barcos y los depositen en las áreas entre el mar y la zona de almacenamiento, que coinciden con las regiones en blanco que figuran en la imagen, para ser recogidos por elementos de transporte especializados en transporte de contenedores. Estos vehículos, que conocen la ubicación de destino de los contenedores en el área de almacenamiento, se dirigen hacia el bloque de destino y lo recorren de manera paralela por una pista ubicada entre bloques para su desplazamiento. Esto se puede ver en la imagen izquierda de la figura 3.1.3 donde los vehículos que aparecen en naranja se desplazan desde un barco hacia el lateral de un bloque siguiendo una ruta marcada en puntos. Estos vehículos se ubican en el lateral para que la grúa de patio, o Yard Crane, característica de este tipo de terminales, que figura como una barra negra encima de los bloques en la imagen, recoja el contenedor y lo almacene en el bloque.



Figura 3.1.4: Estructura la terminal portuaria de Shanghai con configuración asiática. Fuente: cronista.com

Respecto a la **configuración europea**, esta es la estructura característica de las nuevas terminales portuarias que se están construyendo hoy en día, y modelo principal de la terminal del prestigioso puerto de Rotterdam. En este modelo vertical presente en la imagen de la derecha de la figura 3.1.3 el proceso de almacenamiento y extracción de contenedores funciona distinto que en la configuración asiática: Inicialmente se depositan los contenedores que provienen de los barcos en las zonas entre el mar y el patio de almacenamiento, que figuran en blanco en la imagen derecha de la figura 3.1.3 al igual que en la configuración asiática, pero sementados entre cada uno de los bloques de la terminal. En estos lugares los vehículos de transporte especializados, marcados en naranja, recogen los contenedores y se dirigen a una zona especial llamada *punto input/output*, o punto I/O. Esta ubicación, que figura en gris en la parte superior de cada bloque de almacenamiento, está dividida en pequeñas secciones donde cabe un único vehículo de transporte de contenedores, por lo que el acceso a la zona de almacenamiento está más limitado que en la modalidad asiática. Los vehículos que desean almacenar y extraer contenedores de dicha zona se dirigirán a estos puntos I/O y las grúas especializadas de este tipo de configuraciones se ubicarán sobre los puntos I/O para recoger los contenedores y almacenarlos en una ubicación dentro del la zona de almacenamiento o patio, la cual predefinida antes de realizar la operación.

Esta configuración europea incrementa el número de elementos posibles de automatizar en las tareas de extracción y almacenamiento de contenedores, lo que incrementa el potencial de productividad y reducción de costes en comparación a la alternativa asiática. No obstante, al contar con un acceso más restringido a la zona de almacenamiento es crucial disponer de un buen método para secuenciar las operaciones de almacenamiento y extracción que permita sobreponer dichas restricciones y exprimir al máximo el potencial de la terminal.

#### 3.1.2. Terminal del Puerto de Valencia

Este trabajo está alineado con el Plan Estratégico 2030 de Valenciaport, y está enfocado principalmente en complementar tecnológicamente la actividad que se desarrollará en la nueva terminal portuaria que se va a construir en el Puerto de Valencia, la cual posee una configuración de terminal europea y se ubicará en el puerto donde se indica en azul en la figura 3.1.5.

Con el objetivo de generar una actividad portuaria más eficiente, sostenible económicamente y responsable con el medioambiente, el Consejo de Administración de la Autoridad Portuaria de Valencia o APV aprobó un proyecto de ampliación del Norte del Puerto de Valencia con una inversión de 542,7 millones de euros para construir una nueva terminal. Esta nueva terminal dedicada a TIL (Terminal Investment Limited), entidad miembro del grupo MSC que es la compañía líder a nivel mundial en el transporte de contenedores, pretende ser líder mundial en impacto medioambiental y automatización de procesos. Los principales objetivos que definen el proyecto de construcción de la nueva terminal son los siguientes:

- **Impacto Medioambiental:** La nueva terminal pretende reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> en un 98 % y emplear fuentes energéticas 100 % renovables manteniendo la capacidad competitiva que el Puerto de Valencia lleva desarrollando hasta la fecha.
- **Automatización de procesos:** Se implementarán una serie de medidas de automatización y optimización de procesos habituales en la logística portuaria para incidir en la eficiencia energética e incremento de la productividad.

Respecto al **impacto económico**, en total el proyecto supondrá una inversión de fondos tanto públicos como privados. La cantidad desembolsada pretende ser compensada manteniendo la contribución al VAB del 2,27 % en la actualizada e incrementando el empleo para superar los 44000 puestos de trabajo, con un salario medio de 32000 euros anuales.

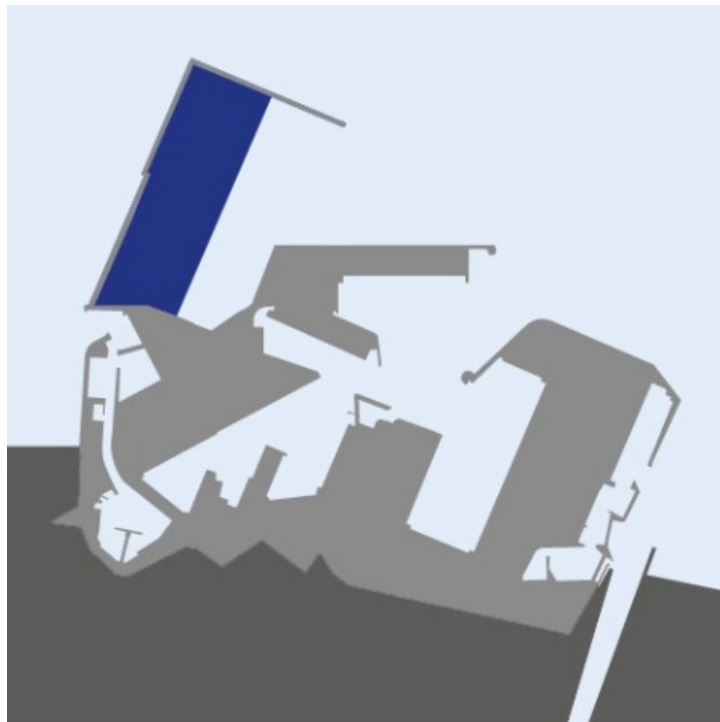


Figura 3.1.5: Ubicación de la nueva terminal portuaria de Valencia. Fuente: valenciaport.es

### 3.1.3. Características y elementos de la terminal portuaria de Valencia

Para el resto del trabajo se considerará la estructura de la terminal portuaria característica del Puerto de Valencia, contemplando sus zonas y elementos principales.



### 3.1.3.1. Zonas principales

En la terminal portuaria se desarrollan actividades muy variadas y de diversa índole para coordinar el proceso de intercambio de contenedores en el transporte marítimo. Sin embargo para el objetivo del trabajo destacan cuatro zonas principales de todas las presentes en la terminal portuaria, que son área de mar o Seaside, el área de tierra o Landside, el patio de almacenamiento o Yard y los puntos input/output.

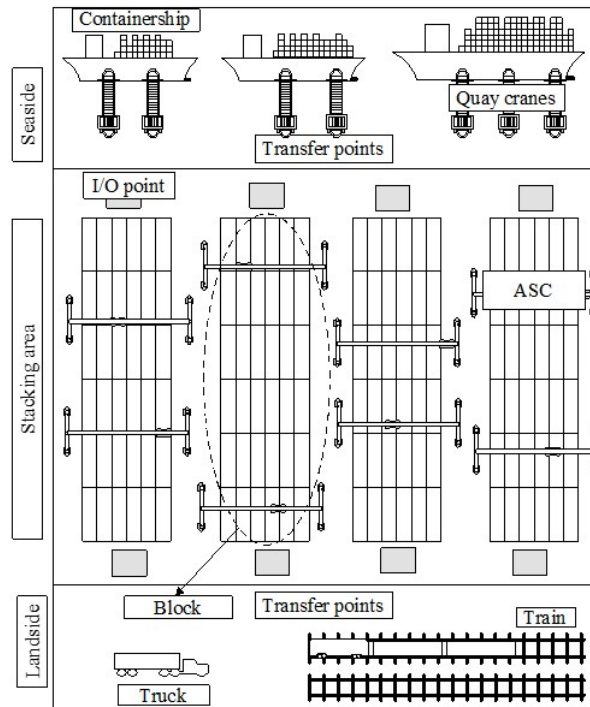


Figura 3.1.6: Estructura de un patio europeo con sus zonas principales: El seaside en la parte superior, el landside en la parte inferior, el patio de almacenamiento entre ambas ubicaciones y los puntos I/O como conexiones entre seaside y landside con el patio.

El **seaside** es la zona de una terminal portuaria que está en contacto directo con el agua y se dedica a las operaciones marítimas, y que se ubica en la parte superior de la imagen 3.1.6. Aquí es donde los barcos atracan para cargar y descargar mercancías que serán recogidas por los vehículos de transporte especializados. En esta zona se ubican los muelles de atraque, que son estructuras construidas a lo largo de la línea de costa donde los barcos pueden amarrar. Estos muelles están diseñados para soportar el peso de los barcos y proporcionar un lugar seguro para el atraque y desatraque.

El **landside** es la parte del puerto conectada con el área terrestre y se dedica a las operaciones logísticas y de acceso terrestre. Se distinguen dentro de esta dos regiones principales: el patio de almacenamiento y la zona de recogida de contenedores. En esta última zona, que se ubica en la parte inferior de la figura 3.1.6, es donde las mercancías ingresan o salen del puerto hacia el país, empleando para ello diferentes modos de transporte terrestre, principalmente camiones o trenes debido al elevado desarrollo de la red de carreteras y el sector ferroviario disponible en el país. Aunque ambas zonas se incluirían en el concepto de landside, ya que ambas están localizadas en tierra, es esta última a la que se referirá como landside para el resto del trabajo. Esto se debe a que el carácter especial del patio de almacenamiento requiere que se lo trate de

manera individual. Esta distinción ya se indica en la imagen de la figura 3.1.6.

El **patio** o yard es la zona principal de almacenamiento de contenedores, indicada en la parte central de la imagen de la figura 3.1.6. El patio de almacenamiento es una parte crucial de una terminal portuaria, que se ubica en el lado landside. Esta región se utiliza para el almacenamiento temporal de mercancías antes de ser extraídas hacia la zona seaside y la zona de recogida de contenedores en el landside. El patio de almacenamiento es una región amplia, organizada y diseñada para optimizar el espacio disponible de manera ordenada, lo cual permite el manejo eficiente de las mercancías y su distribución posterior. Como se ha mencionado antes el patio se divide en **bloques** de almacenamiento, dispuestos de manera vertical en nuestro caso por la configuración europea de la terminal como puede verse en la figura 3.1.7. Cada uno de estos bloques contienen apilados todos los contenedores que se procesan en la terminal, y la estructura de este sistema de apilamiento se compone de filas (rows), bahías (bays) y niveles (tiers), como aparece en 3.1.8. Por lo general los bloques constan de 40 bahías, 7 filas y alrededor de 5 alturas, y estos parámetros sirven de coordenadas que permiten localizar posteriormente los contenedores.

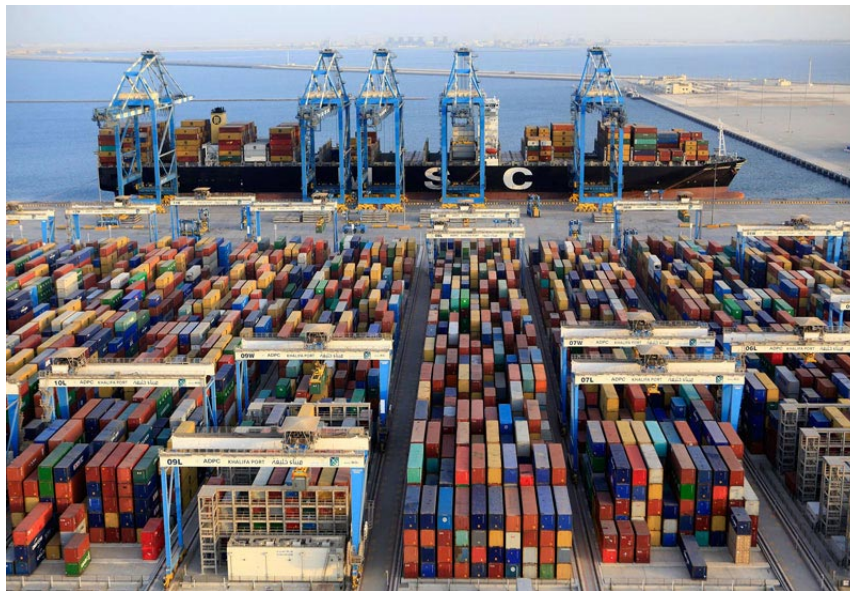


Figura 3.1.7: Conjunto de bloques de una terminal

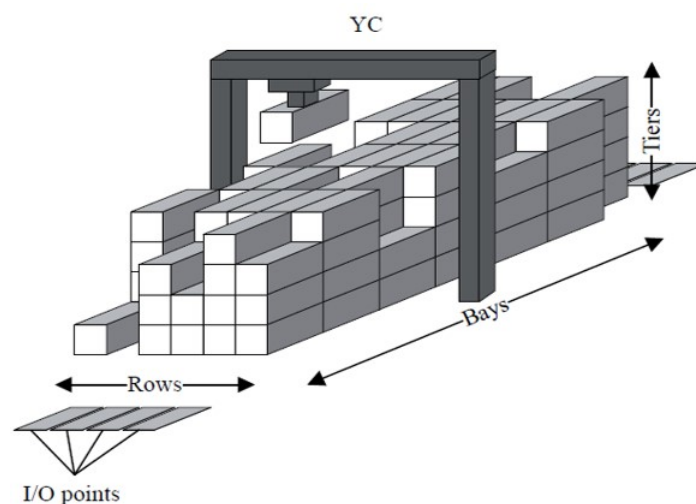


Figura 3.1.8: Sistema de apilamiento de contenedores en los bloques

En esta zona se desarrollan una amplia variedad de actividades relacionadas con el transporte, inspección y seguridad de los contenedores, como pueden ser:

- **Almacenamiento de contenedores:** Es la actividad fundamental de esta zona. Los contenedores son apilados de forma ordenada utilizando equipos especializados, como grúas apiladoras o RTGs (Rubber-Tyred Gantry). Los contenedores pueden agruparse según su destino, tipo de carga o cualquier otro criterio relevante.
- **Registro y seguimiento de inventario:** En el patio de almacenamiento se lleva a cabo un estricto registro y seguimiento de inventario. Cada contenedor o unidad de carga almacenada en el patio se registra en un sistema de gestión de inventario, lo que permite un control preciso de las mercancías y una fácil ubicación en caso de ser necesario.
- **Inspección y seguridad:** Ya que esta zona está dedicada para el almacenamiento de los contenedores se aprovecha para comprobar la veracidad de las mercancías y los destinos asociados a los contenedores que se almacenan ahí.
- **Movimiento de mercancías dentro del patio:** El traslado de mercancías dentro del patio de almacenamiento se realiza mediante equipos de manipulación como los mencionados anteriormente. En ocasiones es necesario reubicar los contenedores para poder tener una disposición óptima de cara a futuras tareas de extracción o almacenamiento de contenedores.

Para realizar la interconexión de el seaside y el landside con el yard se requiere el uso de las zonas denominadas **puntos I/O**, que son regiones dedicadas al depósito temporal de contenedores para ser trasladados entre zonas mediante grúas. A dichas zonas se accede mediante vehículos especializados que transportan los contenedores de los buques y camiones que transportan contenedores de los trenes hacia el patio de la terminal. Estas últimas regiones en particular suelen ser más reducidas en tamaño en comparación con el patio y son un factor limitante a la hora de intercambiar contenedores entre las distintas zonas de la terminal.

#### 3.1.3.2. Elementos principales

Además de las zonas vistas anteriormente, una de las características de este tipo de configuración de terminal son los elementos tecnológicos altamente automatizables que se ubican en las distintas secciones de la terminal para manejar y transportar los contenedores. Para poder acceder y operar en dichas zonas se necesita disponer de una capacidad de transporte suficiente para poder trabajar con elementos de gran magnitud y peso, como es el caso de los contenedores. Es por eso que entre los elementos que operan habitualmente en una terminal de configuración europea destacan los vehículos de transporte especializados y las grúas:

**Vehículos de transporte:** Existen una serie de vehículos que operan entre las zonas de seaside y landside y que son capaces de manejar los contenedores que se descargan de los barcos y transportarlos hacia los puntos I/O para su almacenaje. Estos vehículos se denominan vehículos de guiado automático (AGV) y aparecen en la figura 3.1.10. Estos AGVs son vehículos automatizables que transportan los contenedores entre zonas, pero que no son capaces de elevarlos. Son utilizados con frecuencia en la zona de seaside, mientras que en la zona entre el patio de almacenamiento y la zona de recogida de contenedores del landside es más usual emplear vehículos pilotados por personas, como camiones o similares. Hay otros vehículos destacables que son

capaces de elevar los contenedores además de transportarlos, como pueden ser las Straddle Carriers o los vehículos de elevación automática (ALVs). Para este trabajo se parte del uso de Straddle Carriers (3.1.9) para realizar el conjunto de las operaciones.



Figura 3.1.9: Straddle Carrier



Figura 3.1.10: Vehículos de guiado automático o AGVs

**Grúas:** Entre todos los elementos que operan en una terminal destacan principalmente las **grúas**, que son las máquinas utilizadas para levantar y mover mercancías en las zonas concretas donde se ubican. Existen dos tipos destacables de grúas en una terminal con configuración europea en función de la zona de la terminal donde están ubicadas. Las grúas que se encargan de extraer los contenedores de un barco y depositarlos sobre los vehículos de guiado automático para su transporte son las **grúas de muelle** o Quay Cranes (QC), mientras que las grúas que operan en el patio de almacenamiento y que recogen los contenedores localizados en los puntos

I/O, tanto de seaside como de landside, se denominan **grúas de almacenamiento automático** o Yard Cranes (YC)

Estos cuatro elementos principales, grúas de muelle, AGVs o Straddle Carriers, camiones y grúas de almacenamiento automático necesitan ser coordinados de manera conjunta para sobrepasar las limitaciones de la configuración europea y así sacar a relucir el potencial de este nuevo modelo de terminal.

A diferencia de la terminal asiática, donde los vehículos de transporte de contenedores disponen de un gran espacio entre bloques para moverse, en la configuración europea se limita enormemente esta movilidad al restringir el acceso al patio de almacenamiento mediante los puntos I/O. Es por esto que las grúas de almacenamiento automático toman el papel clave de esta configuración y a su vez suponen el mayor cuello de botella en las operaciones de la nueva terminal. Al ser una maquinaria automatizable, es necesario secuenciar las operaciones de almacenamiento y extracción de contenedores que deben realizar las grúas de almacenamiento de manera que sean lo más eficientes posibles, siendo eficiente en este caso entregar y recoger los contenedores generando el mínimo retardo global en el conjunto de las operaciones que realiza la grúa.



Figura 3.1.11: Grúa de muelle o Quay Crane en la izquierda y grúa de almacenamiento automático o Yard Crane en la derecha

Estas son las zonas y elementos principales incluidos en la nueva terminal de modelo europeo que se construirá en el Puerto de Valencia, como se puede apreciar en la figura 3.1.12. Esta configuración europea es la que más se alinea con las necesidades actuales para la sostenibilidad y eficiencia portuaria, pero es necesario que todos los elementos estén coordinados para explotar el potencial de la configuración, especialmente la secuenciación de las operaciones de la grúa de almacenamiento en el patio de la terminal. Es por esto que para el desarrollo de la nueva terminal colaboran muchas entidades dedicadas fundamentalmente a la optimización de procesos que se implantarán en la terminal una vez esté desarrollada. Uno de esos grupos es el grupo de Sistemas de Optimización Aplicada (SOA) del Instituto Universitario Mixto de la Universitat Politècnica de València, el cual ha centrado sus esfuerzos en desarrollar soluciones avanzadas a este problema real de optimización de procesos, con una posible implantación futura en la terminal. Es por eso que este trabajo, aprovechando la colaboración con los profesionales de este grupo y los conocimientos adquiridos a lo largo de los estudios de Grado, se centra en obtener una solución al problema de secuenciación de grúas de almacenamiento, empleando algoritmos de optimización para su solución.

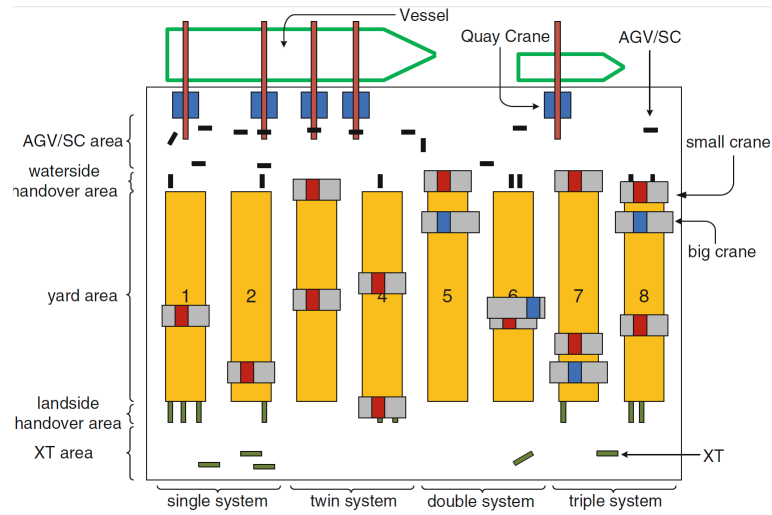


Figura 3.1.12: Estructura de un patio con configuración europea de la terminal portuaria del Puerto de Valencia. Fuente: soa.iti.es



## Capítulo 4

# Optimización Portuaria: El problema de la secuenciación de grúas

En este capítulo se introduce el campo de la optimización portuaria y su relación con el desarrollo de la nueva terminal del Puerto de Valencia. También se describe el principal problema de esta nueva terminal que se solucionará en este trabajo, que es el problema de secuenciación de grúas. Se explicará finalmente cómo se ha solucionado presentando las herramientas utilizadas, que son un modelo matemático y una heurística, describiendo en qué consisten y cómo funcionan.

### 4.1. Investigación operativa y la optimización portuaria

En el capítulo anterior se vió como los elementos de manejo de contenedores, como son los AGVs, los Straddle Carriers, las grúas y los camiones, se coordinan entre ellos de manera efectiva para explotar el potencial de la configuración europea en una terminal. Esta coordinación es clave, porque hay que recordar que la configuración europea, a pesar del potencial latente que posee en eficiencia y sostenibilidad, presenta un aumento considerable en la complejidad de las operaciones en comparación con su alternativa principal, la configuración asiática. Uno de los problemas más importantes de esta configuración es la secuenciación de las operaciones que realiza una grúa ubicada en el patio de almacenamiento de una terminal, con el objetivo de poder atender a las demandas de extracción y almacenamiento de contenedores en el día a día de la actividad portuaria.

El principal propósito de este trabajo es ofrecer una solución a este problema, que sea rápida y aporte buenos resultados, para que la nueva terminal portuaria que se construirá en el Puerto de Valencia pueda ofrecer todo su potencial. Haciendo uso de los conocimientos adquiridos en el Grado de Administración y Dirección de empresas, se ha decidido emplear herramientas de investigación operativa, asignatura presente en el temario de la carrera, y cuya naturaleza la hace ideal para esta situación.

La investigación operativa es la disciplina que se encarga de elaborar métodos analíticos para mejorar el proceso de toma de decisiones, empleando herramientas de campos como las matemáticas, la estadística, la programación o la optimización para ello. La principal ventaja de este campo respecto a otras alternativas es que permite obtener soluciones muy buenas, e incluso óptimas, a problemas realmente complejos en un intervalo de tiempo razonable para la actividad en la que se aplica, lo cual la hace perfecta para el problema que se va a solucionar.



Debido a sus características, la investigación operativa ha resultado de gran aplicación en el campo de la optimización portuaria, a causa del elevado desarrollo de el sector del transporte marítimo en los últimos años, siendo optimización portuaria el proceso que conlleva maximizar la eficiencia de las operaciones que se desarrollan en un puerto con el objetivo de mejorar su rendimiento.

Este campo es fundamental para para que la actividad portuaria se desarrolle con eficacia y eficiencia, porque incide en aspectos como la minimización de costes o la reducción de tiempos de suministro, los cuales se traducen en una mejor y más sostenible gestión de los recursos y una mejora en la competitividad en el mercado internacional. Los tutores de este trabajo son especialistas en problemas de optimización portuaria y han desarrollado distintos proyectos de optimización enfocados a entornos reales y cercanos [5][11]. Esto ha permitido encauzar el desarrollo de la solución propuesta de una manera óptima para su aplicación en la nueva terminal.

### 4.1.1. Tipos de problemas

En la actividad portuaria están involucrados una gran variedad elementos, ya sean infraestructuras, mercancías, maquinarias o trabajadores relacionados directa o indirectamente con la actividad. Es por esa razón que mediante la optimización portuaria se puede incidir en una gran variedad de problemas que ocurren en una terminal, entre los que se encuentra el problema de secuenciación de grúas. Algunos ejemplos son los siguientes:

**Problema de localización de contenedores:** Como se ha podido ver en apartados anteriores en la terminal portuaria hay un patio donde se ubican los contenedores para ser almacenados o extraídos. Las ubicaciones de los contenedores dentro del patio son críticas para disminuir el retraso incurrido en las tareas de extracción y almacenamiento de contenedores de la terminal, y es por eso que no pueden ser determinadas de manera aleatoria.

**Problema de asignación de amarre:** Para acceder a la terminal portuaria por vía marítima se ha de asignar a los barcos que llegan al puerto un lugar en el muelle para poder atracar y descargar o recoger la mercancía, de manera que el tiempo de estancia en dicho muelle sea el mínimo posible. El problema de asignación de amarre o Berth Allocation Problem (BAP) se encarga de gestionar dichas asignaciones para cumplir ese objetivo.

**Problema de secuenciación de grúas:** Una vez que los barcos han sido asignados y los contenedores situados en el patio, se han de secuenciar las operaciones que realizará la grúa ubicada dentro del patio de almacenamiento para extraer y almacenar los distintos contenedores, y así atender a todas las operaciones que ocurren en la terminal portuaria. El problema de secuenciación de grúas o Crane Scheduling Problem (CSP) posee una naturaleza combinatoria muy elevada que crece de manera drástica cuantos más contenedores hay que extraer o almacenar. Es por esto que representa uno de los mayores cuellos de botella en la actividad, ya que todos los contenedores que se procesan en una terminal deben pasar por el patio de almacenamiento y deben ser gestionados por la grúa que allí se ubica.

Una gran solución para estos problemas de alta complejidad es desarrollar algoritmos o modelos que permitan solucionar estos problemas en un intervalo de tiempo razonable. Estos métodos han demostrado con el tiempo ser la mejor opción y aportar un gran valor añadido al desarrollo de la propia actividad [13].

## 4.2. El problema de secuenciación de grúas

Dentro del campo de la optimización portuaria el problema de la secuenciación de grúas, o Crane Scheduling Problem, es uno de los más importantes y difíciles de afrontar en una terminal con configuración europea, como es la nueva terminal del Puerto de Valencia. La secuenciación de grúas afecta al conjunto de todas las operaciones que suceden en un puerto, debido a su efecto directo en la gestión de las operaciones de almacenamiento y extracción de contenedores, y debido al papel que toma el patio de almacenamiento como nodo entre el comercio marítimo y terrestre.

### 4.2.1. Descripción del problema

El problema que se va a resolver consiste en la secuenciación de las operaciones que realizará una única grúa localizada en un único bloque dentro del patio de una terminal, para poder atender a una serie de peticiones de almacenamiento y extracción de contenedores que suceden en dicho bloque con el menor retardo global posible. Este problema de secuenciación consta de dos decisiones principales, que son el orden en el que se deben atender las operaciones de almacenamiento y extracción de contenedores y la asignación de puntos I/O para poder realizarlas, ya que para que un contenedor pueda acceder y salir del patio debe situarse en un punto I/O, que es la única vía de acceso al patio.

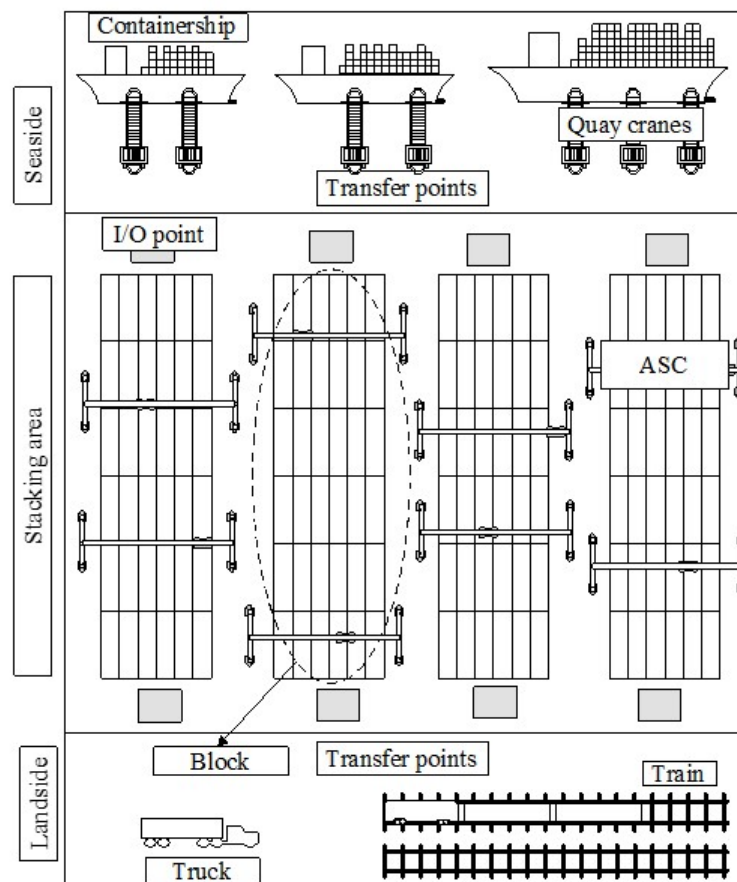


Figura 4.2.1: Estructura de un patio con configuración europea que servirá como referencia para los elementos del problema

El problema de secuenciación de grúas se define de la siguiente manera: En un momento dado, la grúa de almacenamiento que opera dentro de un bloque tiene un número determinado de operaciones de almacenamiento y extracción que debe servir, las cuales vienen tanto del seaside como del landside. Estas zonas se han explicado en el capítulo 3, y se ubican en la parte superior e inferior del patio como se aprecia en la figura 4.2.1. Para poder acceder al patio desde el landside y el seaside se deben emplear los puntos I/O, que son un conjunto de zonas que forman la única vía de acceso hacia el patio de almacenamiento, y es el lugar donde se dirigen los camiones y los Straddle Carrier para almacenar o extraer contenedores. Estas zonas se ubican en gris en la parte superior e inferior de cada bloque como se aprecia en la figura 4.2.1.

### 4.2.2. Datos iniciales del problema

Tras exponer el problema a abordar, a continuación se resumirán los elementos clave a tener en cuenta para diseñar la solución:

- **Bloque:** Es la zona en la que sucede el problema de secuenciación de grúas. Está organizado en filas, bahías y niveles, donde las filas y las bahías coinciden con las dimensiones horizontal y vertical del bloque, y los niveles con el número de contenedores que se pueden apilar dentro de un bloque.

En el contexto del problema, será necesario conocer el número de filas, bahías y niveles que posee el bloque.

- **Puntos I/O:** Zonas ubicadas en los extremos del bloque para poder extraer y almacenar los contenedores. Su número es limitado y muy reducido en comparación con las dimensiones del bloque, por lo que suponen un factor limitante del problema. Cada operación de almacenamiento y extracción de contenedores **debe tener asignado un punto I/O**, para que el Straddle Carrier o el camión que debe acudir para recoger o almacenar un contenedor se pueda situar en él. Una vez que un vehículo ocupa un punto I/O ningún otro vehículo se puede ubicar ahí, dejando este punto **ocupado** hasta que haya finalizado la operación.

En el contexto del problema, será necesario conocer el número de puntos I/O disponibles en landside, el número de puntos I/O disponibles en seaside y su ubicación en el bloque.

- **Grúa:** Es el elemento principal del problema de secuenciación y único elemento que puede manejar contenedores dentro de un bloque. Su tarea consiste en atender a todas las peticiones de almacenamiento y extracción de contenedores minimizando el retardo global incurrido. La grúa puede desplazarse dentro del bloque de manera simultánea en filas y bahías para mejorar la movilidad para afrontar las peticiones y puede desplazarse cargando un contenedor o en vacío. La grúa se ubica inicialmente en la altura máxima posible para el bloque y desciende para recoger los contenedores de cada ubicación.

Respecto a los datos del problema, se conoce la ubicación inicial de la grúa dentro del bloque, así como la velocidad a la que se desplaza dentro del bloque.

- **Contenedores u Operaciones:** Número total de operaciones que se deben atender durante la actividad, relacionadas con un contenedor. A cada operación le corresponde un contenedor que debe de ser almacenado o extraído en el bloque, por lo que a las operaciones también se les puede referir como contenedores. De cada operación se conocen una gran cantidad de parámetros relevantes para la solución, como pueden ser:

*Tipo de contenedor.* En función de la maniobra que se va a realizar las operaciones se clasifican en cuatro tipos distintos.

1. **Sea to Yard.** Los contenedores proceden de un buque y necesitan ser almacenados en una ubicación conocida del bloque. En el contexto del problema serán las operaciones de **tipo 1 (C1)**. Estos contenedores ( $c$ ) tienen una fecha asignada denominada  $r_c$  que indica **el instante en el que llegan al punto I/O para ser almacenado**. Recogerlo más tarde de este instante se penalizará por el retardo en atender la operación.
2. **Land to Yard.** Los contenedores proceden de tierra mediante un tren o camión y han de ser almacenados en una ubicación conocida del bloque. En el contexto del problema serán las operaciones de **tipo 2 (C2)**. Estos contenedores ( $c$ ) tienen una fecha asignada denominada  $r_c$  que indica **el instante en el que llegan al punto I/O para ser almacenado**. Recogerlo más tarde de este instante se penalizará por el retardo en atender la operación.
3. **Yard to Sea.** Los contenedores se recogen de una ubicación conocida del patio para ser mandados a un buque, por lo que deben ser depositados en un I/O que ha de asignarse. En el contexto del problema serán las operaciones de **tipo 3 (C3)**. Estos contenedores ( $c$ ) tienen una fecha asignada denominada  $d_c$  que indica **el instante en el que deben de ser depositados en el punto I/O para ser extraído**. Entregarlo más tarde de este instante se penalizará por el retardo en atender la operación, pero entregarlo antes también se penalizará, ya que el contenedor estará bloqueando dicho punto I/O, lo que implica que no estará disponible para asignarse a otras operaciones.
4. **Yard to Land.** Los contenedores se recogen de una ubicación conocida del patio para ser mandados a un tren o camión, por lo que deben ser depositados en un I/O del lado de tierra que ha de asignarse. En el contexto del problema serán las operaciones de **tipo 4 (C4)**. Estos contenedores ( $c$ ) tienen una fecha asignada denominada  $e_c$  que indica **el instante en el que deben de ser depositados en el punto I/O para ser extraído**. Entregarlo más tarde de este instante se considera un retardo, y no pueden ser depositados antes, ya que en el lado de tierra deben esperar a los camiones para que se sitúen en el punto I/O, mientras que en el lado de mar los vehículos automáticos pueden situarse en cualquier momento.

*Ubicación.* Se conocen las ubicaciones dentro del bloque asociadas a cada operación. Para las operaciones de almacenamiento (o tipos 1 y 2) se conoce la ubicación donde se almacenará el contenedor dentro del bloque. Para las operaciones de extracción (o tipos 3 y 4) se conoce la ubicación dentro del bloque de los contenedores que tendrán que sacar.

*Tiempos.* Se conocen los instantes en los que se requieren los contenedores en los puntos I/O para cada operación. Para las tareas de tipo 1 y 2, que son las de almacenamiento, se conocen los instantes en los que un vehículo se acercará al punto I/O con un contenedor para que se pueda almacenar, y para las tareas 3 y 4, que son las de extracción, se conoce el instante en el que se debe llevar un contenedor al punto I/O para que los vehículos de transporte puedan recogerlos.

DATOS OPERACIONES			
Operación	Tipo	Ubicación (R, B, T)	Instante
1	3	10, 5, 3	13
2	4	6, 27, 3	79
3	2	8, 31, 4	10
4	4	1, 36, 2	0
5	1	4, 8, 3	21

DATOS BLOQUE		
Filas (R)	Bahías (B)	Niveles (T)
10	42	4

DATOS PUNTOS I/O			
Número Mar	Ubicación (R, B, T)	Número Tierra	localización
1	1, 0, 1	1	2, 43, 2
2	2, 0, 1	2	3, 43, 2
3	3, 0, 1	3	4, 43, 2
4	4, 0, 1	4	5, 43, 2
5	5, 0, 1	5	6, 43, 2
6	6, 0, 1	6	7, 43, 2
7	7, 0, 1		
8	8, 0, 1		
9	9, 0, 1		
10	10, 0, 1		

DATOS GRÚA		
Número de grúas	Posición Inicial (R, B, T)	Velocidad
1	2, 39, 5	1

Tabla 4.2.1: Ejemplo de datos iniciales de un problema

En la tabla 4.2.1 puede verse un ejemplo de los datos iniciales de un problema. Para entender los datos de las operaciones se analizará la primera operación que se recibe, que se indica con el número 1. Esta es de tipo 3, lo que quiere decir que se va a realizar una operación de extracción y el contenedor tendrá que ser extraído en el lado de mar o seaside. Como es una operación de extracción, la ubicación en filas, bahías y niveles (o Rows, Bays y Tiers, como indican las siglas R, B, T) corresponde a la ubicación del contenedor dentro del patio. La ubicación (10, 5, 3) indica por lo tanto que el contenedor que va a ser extraído se localiza en la fila 10 y columna 5 del bloque, y se sitúa en la altura o nivel 3, lo que quiere decir que está encima de otros dos contenedores. El instante de tiempo en el que la operación se necesita en el punto I/O de seaside es el 13. Se puede apreciar que el instante no lleva indicado ningún valor concreto de unidad temporal, ya sean segundos, minutos u horas, por lo que se pueden ajustar a las unidades que se deseen.

El bloque de este ejemplo consta de 10 filas, 42 bahías y 4 niveles en total, y cuenta con 10 puntos I/O en el lado seaside y 6 puntos I/O en el landside. Es importante tener en cuenta que los puntos I/O no están incluidos en las dimensiones del bloque, a pesar de estar ubicados con referencia de filas, bahías y niveles. Las bahías del bloque, en cuanto a coordenadas, corresponderían a las bahías de la 1 a la 42, y al fijarse en las ubicaciones de los puntos I/O se puede ver que las bahías que ocupan corresponderían a la 0 y la 43. Esto se realiza de esta manera para poder tener una referencia de la ubicación de los puntos I/O respecto del bloque, y por esa razón se emplea

la misma nomenclatura para su localización. La estructura conjunta de bloque y puntos I/O, junto con las filas y bahías numeradas, se puede ver en la imagen 4.2.2 para mayor aclaración, donde en naranja figuran los puntos I/O disponibles en este bloque, que son 10 en seaside y 6 en landside, junto a su ubicación respecto al patio de almacenamiento, y donde en verde y azul figura el patio de almacenamiento con sus dimensiones. La distinción de colores dentro del patio tiene que ver con qué distancia predomina para el movimiento de la grúa. Esto significa que, ya que la grúa puede moverse simultáneamente en horizontal y vertical y la distancia que recorrerá siempre será la **máxima** posible entre la horizontal y la vertical, las grúas ubicadas en la región azul tardarán lo mismo en acudir a los puntos I/O de un mismo lado, ya que la distancia máxima siempre será la horizontal, mientras que las grúas ubicadas en la región verde no, ya que al estar más cerca de los puntos I/O habrá que tener en cuenta las distancias vertical y horizontal.

En este problema solo se dispone de una grúa que está ubicada en la fila 2, la bahía 39 y el nivel 5. Aquí sucede algo similar que con los puntos I/O, y es que el patio solo consta de 4 niveles, pero aquí se indica que la grúa está en el nivel 5. Esto se debe a que en el patio los niveles corresponden a las posibles alturas en las que se pueden apilar contenedores, lo que implica que en este caso solo pueden apilarse como máximo 4 contenedores. Para poder recoger los contenedores la grúa debe situarse por encima de ellos, y para utilizar la misma referencia que en el bloque en filas, bahías y columnas, se indica que la grúa se ubica en el nivel 5, que querría decir que se ubica por encima del máximo nivel de apilado de contenedores.

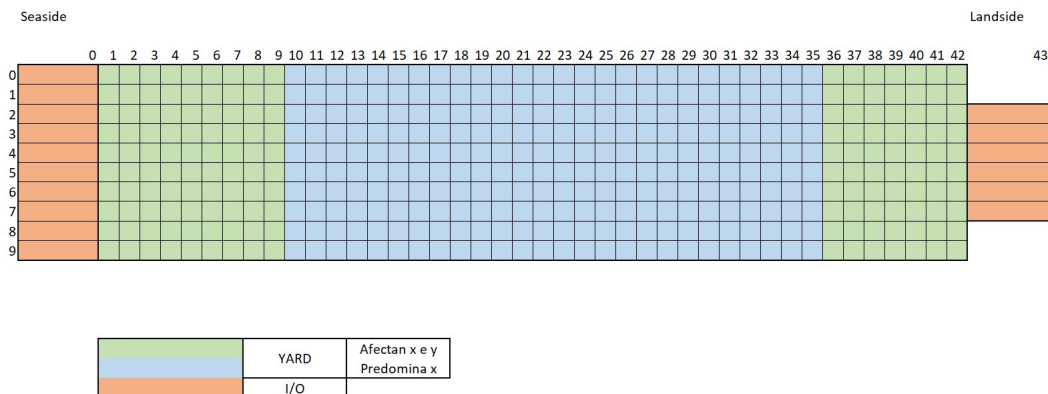


Figura 4.2.2: Vista superior de la estructura de un patio estándar de 10 filas y 42 bahías, como los puntos I/O ubicados a los laterales

### 4.2.3. Métodos para resolver el problema

Partiendo de estos datos, para dar solución al problema de secuenciación de grúas se ha decidido emplear distintas herramientas del campo de la investigación operativa, como son los modelos matemáticos o las heurísticas, que se explicarán en sus apartados 4.3 y 4.4 de la memoria. Se ha decidido emplear estas dos alternativas porque son herramientas que permiten solucionar estos problemas complejos en un intervalo de tiempo razonable, además de aportar un valor añadido al desarrollo de la actividad portuaria [13].

Antes de continuar hay que recordar que en el problema de secuenciación de grúas se tienen en cuenta dos decisiones fundamentales: Por un lado se establece el orden en el que se va a atender a las operaciones de almacenamiento y extracción de contenedores, y por otro lado se asignan los puntos I/O a cada operación, para que los vehículos externos, como los Straddle Carrier o

los camiones, puedan acercarse a dichas zonas y realizar la operación con éxito.

Inicialmente se planteó resolver el problema abordando las dos decisiones de forma conjunta y para ello se decidió emplear un modelo matemático. Un modelo matemático es una herramienta que se emplea en investigación operativa que permite describir un problema real y los elementos que lo componen a partir de expresiones matemáticas. Estas expresiones se componen de 3 elementos principales: la **función objetivo**, que indica el valor que toma la variable que se desea optimizar y qué objetivo se pretende conseguir, las **variables de decisión**, que son los elementos del problema que se pueden modificar para dar lugar a las distintas soluciones, y las **restricciones**, que determinan los márgenes en los que se puede maniobrar para resolver un problema.

La ventaja de los modelos matemáticos es su precisión, ya que si están bien formulados son capaces de obtener la mejor solución al problema que modelizan, razón por la que es un recurso empleado con frecuencia en el área de la optimización. Este aspecto supone una gran ventaja, pero también conlleva ciertos inconvenientes. En situaciones en las que el problema es muy complejo o las restricciones que se imponen son muy rígidas el modelo matemático tarda un tiempo excesivo en obtener una solución. Esto supone que en ocasiones no sea práctico emplearlos.

En el caso de este primer modelo matemático empleado, que comprende ambas decisiones (asignación de I/O y el orden de las operaciones), tiene que determinar un gran conjunto de valores de manera simultánea para alcanzar la solución óptima del problema. Debido a esta gran cantidad de elementos a calcular, para conjuntos de operaciones que superen los 10 contenedores tarda varias horas en obtener la solución. En un sector como el transporte marítimo, donde las peticiones de extracción y almacenamiento se van actualizando constantemente y a un ritmo acelerado, esto supone un gran problema y vuelve al primer modelo matemático planteado infactible para volúmenes de actividad elevados. Por esta razón se decidió separar las dos decisiones y aplicar herramientas de investigación operativa distintas a cada una:

Primero, se empleará una simplificación del primer modelo matemático que obtendrá únicamente la **secuencia óptima de contenedores** cuya extracción o almacenamiento se debe atender para minimizar el retardo global en las operaciones, que es el objetivo principal a resolver en este problema. Esto permitirá reducir el número de variables que el modelo tiene que calcular y a su vez reducir los tiempos de cálculo al rango de segundos.

Tras emplear el modelo se atenderá a la asignación de puntos I/O empleando otra herramienta de la investigación operativa llamada heurística. Las heurísticas son métodos empíricos y prácticos que permiten obtener soluciones muy buenas a los problemas en los que se aplican, y que conllevan una gran reducción en los tiempos de cálculo de soluciones. Es por esto que la heurística se encargará de **volver factible la asignación de puntos I/O** para completar la solución al problema.

Empleando estas dos técnicas de investigación operativa se podrá conseguir una solución muy similar a la obtenida aplicando solo un modelo matemático y con una reducción drástica de los tiempos de cálculo de las soluciones, obteniendo la herramienta idónea para su aplicación en la nueva terminal portuaria del Puerto de Valencia.

### 4.3. Selección de modelo: El modelo matemático de rutas

Para afrontar este problema se ha empleado como base el modelo matemático completo propuesto por los tutores de este trabajo [18], que luego se simplificará para poder afrontar las dos decisiones del problema de forma separada. Este modelo completo permite obtener la ruta que minimiza el retardo global incurrido al atender las operaciones realizadas en un bloque de la terminal, y la asignación de cada contenedor a su punto I/O.

Para entender la solución propuesta no es necesario comprender al detalle el modelo matemático empleado, tan solo es necesario saber que tras su aplicación se obtendrá la solución óptima del problema. Sin embargo, se va a incluir una descripción detallada del modelo completo en el trabajo, y sus ajustes principales para obtener el modelo simplificado, debido a la importancia que presenta para diseñar la solución.

Teniendo en cuenta el contexto y los elementos del problema de programación de grúas, el modelo matemático completo se describe a continuación. Para entender los elementos del modelo, que son función objetivo, variables y restricciones, hay que tener en cuenta la siguiente nomenclatura:

- Para referirse a los conjuntos de puntos I/O se empleará el símbolo  $\mathcal{IO}^{s(c)}$ .
- Para referirse a las localizaciones de los contenedores dentro del bloque se empleará  $l_c$ .
- Para referirse a los contenedores se empleará la letra  $c$ , y al conjunto total de contenedores con la letra  $C$ . En función del tipo de contenedor se distinguen los grupos  $C_1, C_2, C_3$  y  $C_4$  de acuerdo al tipo de contenedor detallado en el apartado 4.2.2. Se distinguirá entre  $c$  y  $c'$  para diferenciar a dos contenedores consecutivos.
- Para el análisis de la función objetivo, los pesos de cada retardo, que son la importancia que se le da al retraso en este tipo de operaciones, se denominan con la letra  $w^R$ . Las fechas de entrega de los contenedores para cada tipo se denominan  $r_c$  para los contenedores de tipos 1 y 2,  $d_c$  para los contenedores de tipo 3 y  $e_c$  para los contenedores de tipo 4. Los pesos asociados al tiempo de ocupación de cada punto I/O se denominan con la letra  $w^C$ , y sirven para penalizar el tiempo que pasa un contenedor ubicado en un punto I/O, que genera congestión.
- Para analizar los movimientos de la grúa,  $Ini$  corresponderá a la ubicación inicial de la grúa en el patio, mientras que  $Fin$  indicará la posición final de la grúa en el patio.  $Ini$  está predefinido en el problema, mientras que  $Fin$  corresponderá a la posición de la grúa tras atender la última operación con contenedor.
- Para analizar los tiempos que tarda la grúa en realizar las operaciones se empleará el símbolo  $t_{ij}$ , que será el tiempo que tarda la grúa en ir de la localización  $i$  a la localización  $j$ , incluyendo el tiempo que tarda en bajar y subir para agarrar o depositar un contenedor.

#### 4.3.1. Descripción de las variables del modelo

Las variables son los elementos del problema que se pueden modificar para generar una solución. Todas las variables empleadas en el modelo matemático simplificado se muestran a continuación:

##### Variables:

Movimientos potenciales de la grúa sosteniendo un contenedor:



$Z_{ij}^c$  1 si la grúa va de  $i$  a  $j$  sosteniendo  $c \in \mathcal{C}$ ; 0, en caso contrario  
donde  $i \in \mathcal{IO}^{s(c)}$ ,  $j = l_c$  si  $c \in \mathcal{C}_1 \cup \mathcal{C}_2$  o  $i = l_c$ ,  $j \in \mathcal{IO}^{s(c)}$  si  $c \in \mathcal{C}_3 \cup \mathcal{C}_4$

Movimientos potenciales de la grúa vacía:

$X_{Ini j}^c$  1 si la grúa va de  $Ini$  a  $j$  para recoger  $c \in \mathcal{C}$ ; 0, en caso contrario  
donde  $j \in \mathcal{IO}^{s(c)}$  si  $c \in \mathcal{C}_1 \cup \mathcal{C}_2$  o  $j = l_c$  si  $c \in \mathcal{C}_3 \cup \mathcal{C}_4$

$X_{i Fin}^c$  1 si la grúa va desde  $i$  a  $Fin$  tras sostener  $c \in \mathcal{C}$ ; 0, en caso contrario  
donde  $i = l_c$  si  $c \in \mathcal{C}_1 \cup \mathcal{C}_2$  o  $i \in \mathcal{IO}^{s(c)}$  si  $c \in \mathcal{C}_3 \cup \mathcal{C}_4$

$X_{ij}^{cc'}$  1 si la grúa va de  $i$  a  $j$  tras sostener  $c \in \mathcal{C}$  para mover  $c' \in \mathcal{C}$ ; 0, en caso contrario  
donde  $i = l_c$  si  $c \in \mathcal{C}_1 \cup \mathcal{C}_2$  o  $i \in \mathcal{IO}^{s(c)}$  si  $c \in \mathcal{C}_3 \cup \mathcal{C}_4$  y  
 $j \in \mathcal{IO}^{s(c')}$  si  $c' \in \mathcal{C}_1 \cup \mathcal{C}_2$  o  $j = l_{c'}$  si  $c' \in \mathcal{C}_3 \cup \mathcal{C}_4$

Clasificación de los contenedores movidos por la grúa:

$Y_{cc'}$  1 si  $c \in \mathcal{C}$  es movido antes de  $c' \in \mathcal{C}$  (no necesariamente antes); 0, en caso contrario

Tiempos de los movimientos de la grúa:

$T_{Ini}$  Tiempo de inicio de la grúa  
 $SC_c$  Tiempo de inicio del movimiento de  $c \in \mathcal{C}$   
 $FC_c$  Tiempo de fin del movimiento de  $c \in \mathcal{C}$

Ocupación de los puntos I/O:

$SO_c$  Tiempo inicial de ocupación de los puntos input/output usados por  $c \in \mathcal{C}$   
 $FO_c$  Tiempo final de ocupación de los puntos input/output usados por  $c \in \mathcal{C}$

Anticipación o retraso en los contenedores de tipo 3:

$E_c, T_c$  Anticipación y retraso respecto a  $d_c$ , para exportar el contenedor  $c \in \mathcal{C}_3$  a un punto I/O.

Estas variables pueden tomar los siguientes valores:

$$\begin{aligned} T_{Ini} &\geq 0 \\ SC_c, FC_c, SO_c, FO_c &\geq 0 && \forall c \in \mathcal{C} \\ E_c, T_c &\geq 0 && \forall c \in \mathcal{C}_3 \\ Z_{vl_c}, X_{Ini v}^c, X_{l_c Fin}^c &\in \{0, 1\} && \forall c \in \mathcal{C}_1 \cup \mathcal{C}_2, v \in \mathcal{IO}^{s(c)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Z_{lcv}, X_{Ini_l}^c, X_{vFin}^c &\in \{0, 1\} & \forall c \in \mathcal{C}_3 \cup \mathcal{C}_4, v \in \mathcal{IO}^{s(c)} \\
 X_{ij}^{c,c'} &\in \{0, 1\} & \forall c, c' \in \mathcal{C} \\
 Y_{cc'} &\in \{0, 1\} & \forall c, c' \in \mathcal{C}
 \end{aligned}$$

### 4.3.2. Descripción del modelo completo

El objetivo del modelo completo es minimizar la siguiente función objetivo:

**Función objetivo:**

$$\begin{aligned}
 \text{Min } & \sum_{c \in \mathcal{C}_1} w_1^R (FC_c - r_c) + \sum_{c \in \mathcal{C}_2} w_2^R (FC_c - r_c) + \sum_{c \in \mathcal{C}_3} w_3^R (FO_c - d_c) \\
 & + \sum_{c \in \mathcal{C}_4} w_4^R (FO_c - e_c) + \sum_{c \in \mathcal{C}_1} w_1^C (SO_c - r_c) + \sum_{c \in \mathcal{C}_2} w_2^C (SO_c - r_c) \\
 & + \sum_{c \in \mathcal{C}_3} w_3^E E_c + \sum_{c \in \mathcal{C}_4} w_4^C (SO_c - e_c) \tag{4.3.1}
 \end{aligned}$$

Esta función objetivo consiste en minimizar el retardo global incurrido al atender a las operaciones de extracción y almacenamiento de contenedores en el bloque de una terminal, junto a la congestión que se produce en los puntos I/O.

El modelo está sujeto a una serie de restricciones relacionadas con los conceptos que aparecen a continuación. Para ayudar a la comprensión de las restricciones, estas se han dividido en bloques atendiendo al propósito de cada una. El contenido de cada bloque se resume de la siguiente manera:

- **Asignación de I/O a contenedores (Bloque 1).** Comprende las restricciones que limitan la asignación de los contenedores a los puntos I/O.
- **Ruta de la grúa desde Ini hasta Fin (Bloque 2).** Comprende las restricciones asociadas a los movimientos de la grúa desde que parte de su posición inicial al comienzo del problema hasta que llega a su posición final.
- **Definición de variables Y: precedencia entre contenedores (Bloque 3).** Estas restricciones se encargan de asegurar de que la grúa realiza las operaciones de manera consecutiva, y que una operación con un contenedor precede a otra. Esto parece evidente para una persona, pero un modelo matemático solo entiende el contexto del problema a partir de las variables y restricciones establecidas, por lo que es necesario indicarlo.
- **Tiempo de cada movimientos (Bloque 4).** Comprende las restricciones asociadas a los tiempos que tarda la grúa en desplazarse dentro del patio y realizar las operaciones.
- **Restricciones que indican las relaciones entre  $SO_c$ ,  $FO_c$ ,  $SC_c$  y  $FC_c$  (Bloque 5).**
- **Disponibilidad de los contenedores (Bloque 6).** Estas restricciones se relacionan con la entrega de contenedores, para asegurar que si un contenedor ha sido entregado deje de contemplarse y si no lo ha sido que siga teniéndose en cuenta para ser procesado.

- **Monotonía de los tiempos de grúa (Bloque 7).** Restricción que similar a las del Bloque 3, pero que esta vez se asegura de que los tiempos asignados a los movimientos de la grúa en cada operación sean anteriores a los tiempos de la grúa en la siguiente operación.

#### 4.3.2.1. Desarrollo matemático de las restricciones de cada bloque

Para cada bloque indicado en la anterior sección se describe el conjunto de las restricciones que se han empleado. Este apartado es el más complejo del problema, por lo que es recomendable fijarse más en las descripciones de las restricciones, que aparecen al final de cada bloque, en lugar de el desarrollo matemático de cada restricción.

**Bloque 1:** *Asignación de I/O a los contenedores*

$$\sum_{i \in \mathcal{IO}^s(c)} Z_{il_c}^c = 1 \quad \forall c \in \mathcal{C}_1 \cup \mathcal{C}_2 \quad (4.3.2)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{IO}^s(c)} Z_{lcj}^c = 1 \quad \forall c \in \mathcal{C}_3 \cup \mathcal{C}_4 \quad (4.3.3)$$

Las restricciones (4.3.2) y (4.3.3) fuerzan que cada contenedor tenga que ser asignado a un único punto I/O.

**Bloque 2:** *Ruta de la grúa desde Ini hasta Fin*

$$\sum_{c \in \mathcal{C}_1 \cup \mathcal{C}_2} \sum_{j \in \mathcal{IO}^s(c)} X_{Ini j}^c + \sum_{c \in \mathcal{C}_3 \cup \mathcal{C}_4} X_{Ini l_c}^c = 1 \quad (4.3.4)$$

$$\sum_{c \in \mathcal{C}_1 \cup \mathcal{C}_2} X_{l_c Fin}^c + \sum_{c \in \mathcal{C}_3 \cup \mathcal{C}_4} \sum_{i \in \mathcal{IO}^s(c)} X_{i Fin}^c = 1 \quad (4.3.5)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{IO}^s(c)} Z_{il_c}^c = X_{l_c Fin}^c + \sum_{c' \in \mathcal{C}_1 \cup \mathcal{C}_2, c' \neq c} \sum_{i \in \mathcal{IO}^s(c')} X_{l_c i}^{c c'} + \sum_{c' \in \mathcal{C}_3 \cup \mathcal{C}_4} X_{l_c l_{c'}}^{c c'} \quad \forall c \in \mathcal{C}_1 \cup \mathcal{C}_2 \quad (4.3.6)$$

$$X_{Ini l_c}^c + \sum_{c' \in \mathcal{C}_1 \cup \mathcal{C}_2} X_{l_{c'} l_c}^{c' c} + \sum_{c' \in \mathcal{C}_3 \cup \mathcal{C}_4, c' \neq c} \sum_{i \in \mathcal{IO}^s(c')} X_{il_c}^{c' c} = \sum_{j \in \mathcal{IO}^s(c)} Z_{lcj}^c \quad \forall c \in \mathcal{C}_3 \cup \mathcal{C}_4 \quad (4.3.7)$$

$$X_{Ini v}^c + \sum_{c' \in \mathcal{C}_1 \cup \mathcal{C}_2, c' \neq c} X_{l_{c'} v}^{c' c} + \sum_{c' \in \mathcal{C}_3 \cup \mathcal{C}_4} \sum_{i \in \mathcal{IO}^s(c')} X_{iv}^{c' c} = Z_{vl_c}^c \quad \forall c \in \mathcal{C}_1 \cup \mathcal{C}_2 \text{ and } \forall v \in \mathcal{IO}^s(c) \quad (4.3.8)$$

$$Z_{l_c v}^c = X_{v Fin}^c + \sum_{c' \in \mathcal{C}_1 \cup \mathcal{C}_2} \sum_{j \in \mathcal{IO}^s(c')} X_{vj}^{c c'} + \sum_{c' \in \mathcal{C}_3 \cup \mathcal{C}_4, c' \neq c} X_{vl_{c'}}^{c c'} \quad \forall c \in \mathcal{C}_3 \cup \mathcal{C}_4 \text{ and } \forall v \in \mathcal{IO}^s(c) \quad (4.3.9)$$

La restricción (4.3.4) fuerza a que la grúa tenga que dejar su posición  $Ini$  y la restricción (4.3.5) indica que la grúa debe acabar su ruta en algún punto. La continuidad de la ruta de la grúa está garantizada por la familia de restricciones (4.3.6), (4.3.7), (4.3.8) y (4.3.9). Las primeras dos familias están asociadas con visitas a la localización del contenedor y las otras dos con visitas al correspondiente punto I/O.

**Bloque 3:** *Definición de variables Y: precedencia entre contenedores*

$$Y_{cc'} + Y_{c'c} = 1 \quad \forall c, c' \in \mathcal{C} \quad (4.3.10)$$

$$\sum_{v \in \mathcal{IO}^s(c')} X_{lcv}^{cc'} \leq Y_{cc'} \quad \forall c, c' \in \mathcal{C}_1 \cup \mathcal{C}_2 \quad (4.3.11)$$

$$X_{lcl'}^{cc'} \leq Y_{cc'} \quad \forall c \in \mathcal{C}_1 \cup \mathcal{C}_2, c' \in \mathcal{C}_3 \cup \mathcal{C}_4 \quad (4.3.12)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{IO}^s(c)} \sum_{j \in \mathcal{IO}^s(c')} X_{ij}^{cc'} \leq Y_{cc'} \quad \forall c \in \mathcal{C}_3 \cup \mathcal{C}_4, c' \in \mathcal{C}_1 \cup \mathcal{C}_2 \quad (4.3.13)$$

$$\sum_{v \in \mathcal{IO}^s(c)} X_{vlc}^{cc'} \leq Y_{cc'} \quad \forall c, c' \in \mathcal{C}_3 \cup \mathcal{C}_4 \quad (4.3.14)$$

$$Y_{cc''} + Y_{c''c'} \leq Y_{cc'} + 1 \quad \forall c, c', c'' \in \mathcal{C} \quad (4.3.15)$$

Para cada par de contenedores, (4.3.10) se asegura de que cada uno precede al otro. Las restricciones (4.3.11), (4.3.12), (4.3.13) y (4.3.14) relacionan el movimiento vacío de la grúa entre el transporte de dos contenedores y las variables Y. El valor correcto de todas las variables Y es asegurado, por transitividad, con las restricciones (4.3.15).

**Bloque 4:** *Tiempo de cada movimiento*

$$FC_c = SC_c + \sum_{v \in \mathcal{IO}^s(c)} t_{vlc} Z_{vlc}^c \quad \forall c \in \mathcal{C}_1 \cup \mathcal{C}_2 \quad (4.3.16)$$

$$FC_c = SC_c + \sum_{v \in \mathcal{IO}^s(c)} t_{lcv} Z_{lcv}^c \quad \forall c \in \mathcal{C}_3 \cup \mathcal{C}_4 \quad (4.3.17)$$

$$T_{Ini} + \sum_{c \in \mathcal{C}_1 \cup \mathcal{C}_2} \sum_{j \in \mathcal{IO}^s(c)} t_{Inij} X_{Inij}^c + \sum_{c \in \mathcal{C}_3 \cup \mathcal{C}_4} t_{Inilc} X_{Inilc}^c \leq SC_{c'} \quad \forall c' \in \mathcal{C} \quad (4.3.18)$$

$$FC_c + \sum_{v \in \mathcal{IO}^s(c')} t_{lcv} X_{lcv}^{cc'} - SC_{c'} \leq M \left( 1 - \sum_{v \in \mathcal{IO}^s(c')} X_{lcv}^{cc'} \right) \quad \forall c \in \mathcal{C}_i, c' \in \mathcal{C}_j, i, j \in \{1, 2\} \quad (4.3.19)$$

$$FC_c + t_{lcl'} X_{lcl'}^{cc'} - SC_{c'} \leq M \left( 1 - X_{lcl'}^{cc'} \right) \quad \forall c \in \mathcal{C}_i, c' \in \mathcal{C}_j, i \in \{1, 2\}, j \in \{3, 4\} \quad (4.3.20)$$

$$FC_c + \sum_{i \in \mathcal{IO}^s(c)} \sum_{j \in \mathcal{IO}^s(c')} t_{ij} X_{ij}^{cc'} - SC_{c'} \leq M \left( 1 - \sum_{i \in \mathcal{IO}^s(c)} \sum_{j \in \mathcal{IO}^s(c')} X_{ij}^{cc'} \right)$$

$$\forall c \in \mathcal{C}_i, c' \in \mathcal{C}_j, i \in \{3, 4\}, j \in \{1, 2\} \quad (4.3.21)$$

$$FC_c + \sum_{v \in \mathcal{IO}^s(c)} t_{vl_c} X_{vl_c}^{cc'} - SC_{c'} \leq M \left( 1 - \sum_{v \in \mathcal{IO}^s(c)} X_{vl_c}^{cc'} \right)$$

$$\forall c \in \mathcal{C}_i, c' \in \mathcal{C}_j, i, j \in \{3, 4\} \quad (4.3.22)$$

Las restricciones (4.3.16) y (4.3.17) relacionan el tiempo inicial y final del movimiento de la grúa sosteniendo cada contenedor. Las restricciones (4.3.18) aseguran que el tiempo inicial del movimiento de la grúa sosteniendo cualquier contenedor es mayor o igual al tiempo final del primer movimiento en vacío de la grúa. Las restricciones (4.3.19), (4.3.20), (4.3.21) y (4.3.22) relacionan el final del movimiento de un contenedor con el inicio del movimiento del siguiente.

**Bloque 5:** *Algunas relaciones entre  $SO_c$ ,  $FO_c$ ,  $SC_c$  y  $FC_c$*

$$SO_c \leq SC_c \quad \forall c \in \mathcal{C}_1 \cup \mathcal{C}_2 \quad (4.3.23)$$

$$FO_c = SC_c \quad \forall c \in \mathcal{C}_1 \cup \mathcal{C}_2 \quad (4.3.24)$$

$$SO_c = FC_c \quad \forall c \in \mathcal{C}_3 \quad (4.3.25)$$

$$FC_c \leq FO_c \quad \forall c \in \mathcal{C}_3 \quad (4.3.26)$$

$$SO_c \leq FC_c \quad \forall c \in \mathcal{C}_4 \quad (4.3.27)$$

$$FC_c = FO_c \quad \forall c \in \mathcal{C}_4 \quad (4.3.28)$$

Para contenedores de los tipos 1 y 2, (4.3.23) garantiza que cada contenedor se depositará en un punto I/O antes de que la grúa lo recoja, mientras que (4.3.24) asegura que la ocupación del punto I/O acabe cuando la grúa recoge el contenedor. Para contenedores de tipo 3, (4.3.25) garantiza que la ocupación del punto I/O comience exactamente cuando la grúa deposite el contenedor en él y (4.3.26) asegura que la ocupación del punto I/O después de que la grúa deje el contenedor en él. Para contenedores del tipo 4, (4.3.27) garantiza que la ocupación del punto I/O comience antes de que la grúa deje el contenedor en él, mientras que (4.3.28) asegura que la ocupación del I/O finalice cuando la grúa deje el contenedor en él.

**Bloque 6:** *Disponibilidad de los contenedores*

$$SO_c = r_c \quad \forall c \in \mathcal{C}_1 \cup \mathcal{C}_2 \quad (4.3.29)$$

$$FO_c \geq d_c \quad \forall c \in \mathcal{C}_3 \quad (4.3.30)$$

$$SO_c = e_c \quad \forall c \in \mathcal{C}_4 \quad (4.3.31)$$

Las restricciones (4.3.29) aseguran que el inicio de la ocupación de un punto I/O por un contenedor de los tipos 1 o 2 es posterior a su fecha de depósito. Las restricciones (4.3.30) aseguran que el fin de ocupación de un punto I/O por un contenedor del tipo 3 es mayor o igual a su fecha de recogida. Las restricciones (4.3.31) garantizan que el inicio de ocupación de un punto I/O por un contenedor del tipo 4 es posterior a su tiempo más temprano de recogida.

**Bloque 7:** *Monotonía en los tiempos de grúa y tiempos de ocupación*

$$FC_c - SC_{c'} \leq M(1 - Y_{cc'}) \quad \forall c, c' \in \mathcal{C}, c \neq c' \quad (4.3.32)$$

Asumimos que el contenedor  $c$  precede al contenedor  $c'$  en la secuencia de movimientos de la grúa, p.ej.,  $Y_{cc'} = 1$ . Las restricciones (4.3.32) establecen que el fin del movimiento de la grúa para  $c$  es anterior al movimiento de la grúa para  $c'$ .

### 4.3.3. Problemas del modelo matemático

Este modelo matemático completo obtiene la solución óptima del problema, pero para conjuntos de operaciones muy grandes no es capaz de obtenerla en un tiempo razonable para la actividad, por lo que se decidió relajar algunas restricciones y, principalmente, simplificar la función objetivo para que no contemple la ocupación de los puntos I/O como coste. Este modelo simplificado generará el orden que se debería seguir para atender las operaciones de almacenamiento y extracción de contenedores de manera óptima, pero **no contemplará el estado de ocupación de los puntos I/O**.

La función objetivo ajustada para este modelo matemático más simplificado es la siguiente:

**Función objetivo simplificada:**

$$\text{Min} \sum_{i=1}^2 \sum_{c \in \mathcal{C}_i} w_i^R (FC_c - r_c) + \sum_{c \in \mathcal{C}_3} w_3^R (FO_c - d_c) + \sum_{c \in \mathcal{C}_4} w_4^R (FO_c - e_c) \quad (4.3.33)$$

Que si se compara con la función objetivo del apartado de descripción del modelo, se aprecia que las componentes que ponderaban el coste de ocupación de los puntos I/O han sido eliminadas.

Es importante tener en cuenta que este ajuste nos deja con un modelo que soloamente genera el orden óptimo de las operaciones que debe realizar la grúa, sin contemplar la ocupación de los puntos I/O a la hora de asignar contenedores. Esto supone que en ocasiones se asigne el mismo punto I/O a dos operaciones consecutivas del mismo lado, seaside o landside, y que en el mismo instante de tiempo hay **más de un contenedor ocupando el mismo punto I/O**, y esto en la realidad no es posible. No es posible porque solo puede haber un solo vehículo, ya sea Straddle Carrier o camión, ubicado en un punto I/O en un determinado instante de tiempo, y esos vehículos solo son capaces de transportar un contenedor. Que haya dos contenedores asignados al mismo punto I/O en el mismo instante implicaría que un vehículo lleva dos contenedores, o que en el punto I/O hay ubicados dos vehículos simultáneamente, y esto no es posible por lo que se acaba de explicar.

Para poder visualizar esta situación de mejor manera se empleará el ejemplo empleado en apartados anteriores, cuyos datos se enuncian en la tabla 4.2.1 de la sección de datos iniciales del problema. Al introducir estos datos en el modelo matemático se obtienen los siguientes resultados:

Operación	I/O asignado	CG	FG	CO	FO	Tipo	Ubicación (R, B, T)
1	9	70	81	81	81	3	10, 5, 3
2	6	126	147	79	147	4	6, 27, 3
3	5	25	41	10	25	2	8, 31, 4
4	5	6	19	0	19	4	1, 36, 2
5	9	89	103	21	89	1	4, 8, 3

Tabla 4.3.1: Datos iniciales de las operaciones

De aquí ya conocíamos los valores de Operación, Tipo y Ubicación, que son los aportados por los datos iniciales, y se han incorporado 5 parámetros más que corresponden con las variables del modelo, que son el IO asignado, CG, FG, CO y FO.

- **IO asignado:** Es el punto I/O que el modelo matemático le ha asignado a una operación para establecer la ruta óptima que minimiza el retardo global de las operaciones. En el caso de la operación 1, que al ser de tipo 3 se trata de una exportación por el lado de mar o seaside, indica que el contenedor será depositado en el punto I/O número 9 de seaside para ser recogido por los vehículos.
- **CG o Comienzo de Grúa:** Indica el instante de tiempo en el que la grúa comienza a atender una determinada operación. Un valor más pequeño de CG implica que esa operación se realiza antes, y es por eso que la operación 4, cuyo CG es de 6, es la que primero se atiende de todas.
- **FG o Final de Grúa:** Indica el instante en el que la grúa termina de atender la operación, y coincide con el momento en el que deposita un contenedor en el patio en para operaciones de almacenamiento, o deposita un contenedor en un punto I/O para tareas de extracción.
- **CO o Comienzo de Ocupación de punto I/O:** Este parámetro indica en qué instante el punto I/O que ha sido asignado a una operación pasa a estar ocupado. Esto es el instante inicial en el que un vehículo de transporte, con o sin contenedor, se ubica dentro del punto I/O para ocuparlo y permite a la grúa realizar la operación de almacenamiento o extracción.
- **FO o Final de Ocupación de punto I/O:** Este parámetro indica el instante en el que un punto I/O ocupado por un vehículo de transporte pasa a ser liberado. Este instante coincide con el momento en el que la grúa se acerca al punto I/O asignado a una operación y recoge, o deposita, el contenedor correspondiente.

Con estos datos que se presentan, una imagen del problema en este momento sería como la que aparece en la figura 4.3.1, donde la grúa inicia el movimiento desde la casilla roja. Los movimientos de la grúa en vacío se reflejan con flechas azules, y los movimientos de la grúa cargando contenedores se reflejan con flechas naranjas. Para analizar el solape nos vamos a fijar en las operaciones número 3 y 4, que si nos fijamos en los valores de CG de la tabla 4.2.1 y en el esquema de la solución, se puede ver que son operaciones consecutivas, en el mismo lado del patio (landside) y que tienen asignados el mismo punto I/O. Estas son las condiciones que permiten detectar un posible solape, que es como se referirá a partir de ahora a la situación de tener dos operaciones asignadas al mismo punto I/O de manera simultánea.

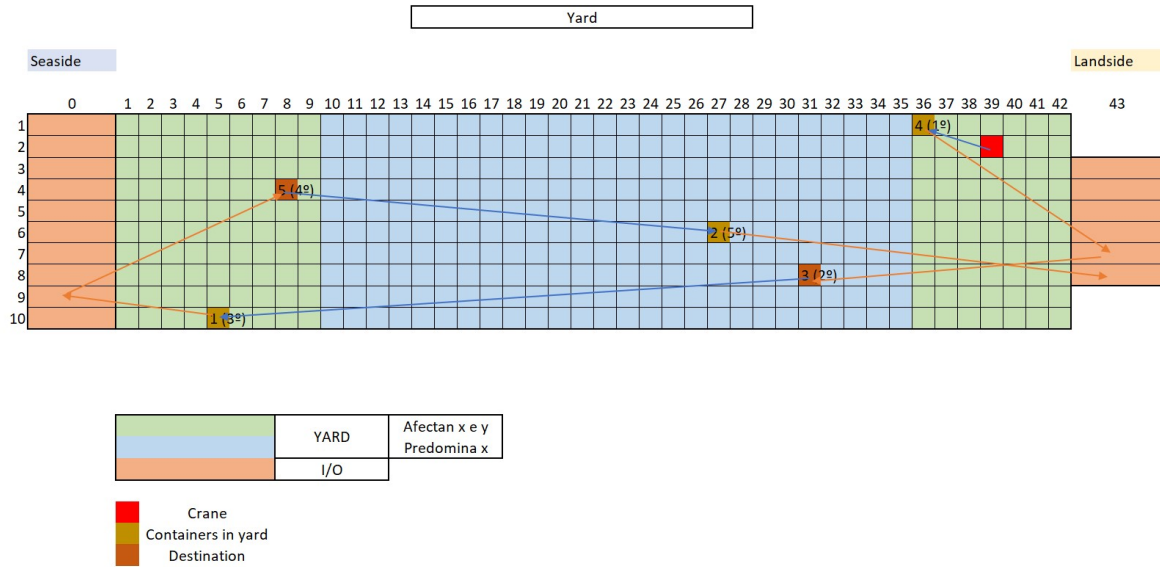


Figura 4.3.1: Esquema de la solución del modelo matemático para los datos del ejemplo

Comenzando por la operación 3, esta operación tiene el punto I/O número 5 de landside asignado. Los tiempos de comienzo y fin de ocupación son  $CO = 10$  y  $FO = 25$ . Al ser una operación del tipo 2, quiere decir que se va a almacenar un contenedor en el patio que viene desde el landside. Por esta razón estos valores de  $CO$  y  $FO$  indican que desde el instante 10 hasta el 25 el punto I/O 5 de landside estará ocupado por un camión que lleva un contenedor. Ahora si nos fijamos en la operación 4, que tiene el mismo punto I/O asignado que la operación 3, sus tiempos de comienzo y final de ocupación de punto I/O son  $CO = 0$  y  $FO = 19$ . Al ser una operación de tipo 4, que consiste en extraer un contenedor hacia el landside, quiere decir que en este intervalo de tiempo el punto I/O estará ocupado por un vehículo en vacío, esperando a recoger un contenedor. Si nos fijamos en los valores de ambas operaciones, se puede ver que entre el instante 10 y el instante 19 se ha asignado el mismo punto I/O de manera simultánea a ambos vehículos, por lo que en este caso sí que hay solape. Esta misma situación sucede en el lado de seaside con las operaciones 1 y 5.

Este solape vuelve a esta operación infactible, pero prometedora, ya que si no se contempla el asunto del solape esta sería la ruta óptima que minimizaría el retardo global incurrido. Por esto se tratará de ajustar esta solución, sin modificar el orden de las operaciones, para factibilizarla y obtener una solución al problema de secuenciación de grúas lo más parecida a la ofrecida por el modelo matemático completo. Para realizar esta tarea se ha decidido emplear una heurística.

#### 4.4. Algoritmo heurístico de factibilización

Con el objetivo de factibilizar la solución se ha desarrollado una heurística que complementa al modelo matemático empleado. En esta sección se explica el algoritmo heurístico desarrollado y qué recursos se han empleado para su diseño.



##### 4.4.1. Metodología y recursos empleados en el desarrollo de la heurística

Como el objetivo principal es solucionar el problema de secuenciación de grúas para aplicarlo en la nueva terminal portuaria del Puerto de Valencia, se ha decidido no solo diseñar la heurística que complementará al modelo matemático, sino realizar su implementación directa desarrollando un programa de ordenador que con tan solo introducir los datos del problema y la solución ofrecida por el modelo matemático sea capaz de aplicar la heurística y generar la solución corregida sin solape. De esta forma no solo se desarrollará una solución al problema de secuenciación de grúas, también se podrá comprobar el potencial de la solución diseñada y ofrecer directamente la herramienta para su aplicación en la actividad de la nueva terminal.

Para el desarrollo e implementación del programa que ejecutará la heurística se ha decidido emplear Python, que es un lenguaje de programación orientado a objetos que ha ganado mucha popularidad en los últimos años [4]. Su potencia y versatilidad han permitido que se utilice en una gran variedad de campos, entre los que figura la investigación operativa.

##### 4.4.2. Desarrollo del algoritmo heurístico

Los algoritmos son métodos sistemáticos computacionales bien definidos que toman algún valor, o conjunto de valores, como entrada y produce algún valor, o conjunto de valores, como salida [1]. Un algoritmo es, por tanto, una secuencia de pasos computacionales que transforman una serie de valores de entrada en una salida determinada de acuerdo a los pasos realizados. En este caso el algoritmo que se propone generará, a partir de la solución producida por el modelo, modificaciones a pequeña escala o "locales" que permitan encontrar una solución similar a la dispuesta inicialmente sin modificar demasiado el valor de la función objetivo, que sería en este caso el coste total incurrido en las operaciones [9].

El algoritmo se ha desarrollado mediante dos iteraciones principales, cuyo proceso de desarrollo global se eludirá, pero cuyos fundamentos principales que permiten factibilizar la solución se explican a continuación, que son la reasignación de punto I/O por proximidad y la espera de los vehículos fuera de los puntos I/O:

###### 4.4.2.1. Reasignación de puntos I/O y espera de los vehículos

En bloques donde se disponga de varios puntos I/O lo más conveniente para factibilizar la solución será reasignar un punto I/O cercano al asignado originalmente. Estos movimientos son los ideales para generar un menor cambio en el coste total, manteniendo el orden original establecido de las operaciones que debe realizar la grúa. En caso de que no se pueda realizar ningún procedimiento de reasignación, se le indicará a los vehículos que generen un mayor solape que esperen fuera de los puntos I/O, y que solo accedan una vez la grúa se acerque al punto para atender su petición. No tendría sentido implementar esta última medida de espera de los vehículos fuera del punto I/O sin incurrir a un coste asociado, ya que lo mejor para que la actividad portuaria discurra con normalidad es que los vehículos se ubiquen dentro del punto I/O para realizar las operaciones. Al dejar en espera a los vehículos fuera del punto I/O el tiempo que tarda la grúa en realizar la operación será mayor y se incrementará la penalización.

Para ver cómo se realiza todo este proceso se solucionará el problema que se ha usado como ejemplo a lo largo de este capítulo, siguiendo los pasos descritos en el pseudocódigo que figura en el **Algoritmo 1** de esta sección, y que resume el funcionamiento de la heurística .

Siguiendo los pasos establecidos en el pseudocódigo, primero obtendríamos los datos asociados a cada operación a partir de la información del problema de la tabla 4.2.1 y la información de la solución de la tabla 4.4.1. Con esta información el algoritmo clasificará las operaciones según el lado del patio en el que suceden y el punto I/O asignado. Este es el proceso que se ha realizado en la explicación de la sección anterior para detectar los posibles casos de solape. Una vez agrupadas las operaciones por zona y punto I/O comenzará el proceso de detección de solape, fijándose en los tiempos de comienzo y final de ocupación de punto I/O (CO y FO) de cada uno de los grupos de operaciones que se ha establecido.

En caso de no haber solape no se modificará la solución y nos encontraríamos ante la solución óptima del problema. En el momento en el que se detecta solape en una solución, como es el caso de este ejemplo, se debe reasignar el punto I/O asociado al menos a una de las dos operaciones para eliminar el solape. Recordamos que en este problema existía solape en el punto I/O número 5 de seaside y el punto I/O número 9 de landside, como mostraban los datos de la tabla 4.2.1. De las dos operaciones se reasignará el punto I/O de la que se atiende más tarde, ya que si se modifica la primera operación del total el retardo incurrido se acumulará para el resto de operaciones, generando un perjuicio mayor que si se modifican las operaciones posteriores.

---

**Algoritmo 1:** Algoritmo heurístico que factibiliza la solución del modelo simplificado

---

```

Input : ConjuntoOperaciones, Patio
Output: OperacionesArregladas, Coste

for operacion en ConjuntoOperaciones do
  | Se extraen los datos asociados a cada operación
end

if operacion es operación de seaside then
  | Se agrupa la operación en el conjunto de seaside por I/O
end
if operacion es operación de landside then
  | Se agrupa la operación en el conjunto de landside por I/O
end

for Operación agrupada en zona e I/O do
  Calcular solape con el resto de operaciones
  if No hay solape then
    | No modificar
  end
  else
    | Calcular puntos I/O más cercanos y no utilizados
    while Existe Solape do
      if Punto I/O disponible then
        | Reasignar punto IO
      end
      else
        | Dejar operación con mayor solape en espera y computar el coste asociado.
      end
    end
  end
end

end
  Calcular nuevos tiempos de grúa
  Calcular nuevo coste de la operación

```

---

Para reasignar los puntos I/O se hace una lista de puntos I/O ordenada por **proximidad y**

**relevancia**, de forma que para el punto I/O número 9 de landside la lista sería (8, 10, 7, 6, 5, 4, 3, 2, 1). Se ubica el número 8 por encima del 10, a pesar de tener la misma distancia al punto I/O, porque reasignar a puntos I/O más centrales da lugar a mejores resultados que reasignando hacia los extremos. Como el punto I/O número 8 no está asignado a ninguna operación en un instante cercano, la operación que ocurre más tarde (operación 5) tendrá su punto I/O reasignado al número 8. En caso de que el punto I/O estuviese ocupado en instantes cercanos al de la operación, se pasaría al siguiente número de la lista, que sería el 10. En caso de no poder reasignar ningún punto I/O, se dejaría en espera al vehículo que genere mayor solape y se añadiría dicha espera en la función de coste.

Tras resolver todos los solapes solo faltaría volver a calcular los tiempos de las operaciones (CG, FG, CO, FO) y calcular el nuevo coste total de la operación para compararlo con el inicial.

La solución final aplicado este método para el problema de ejemplo sería la siguiente:

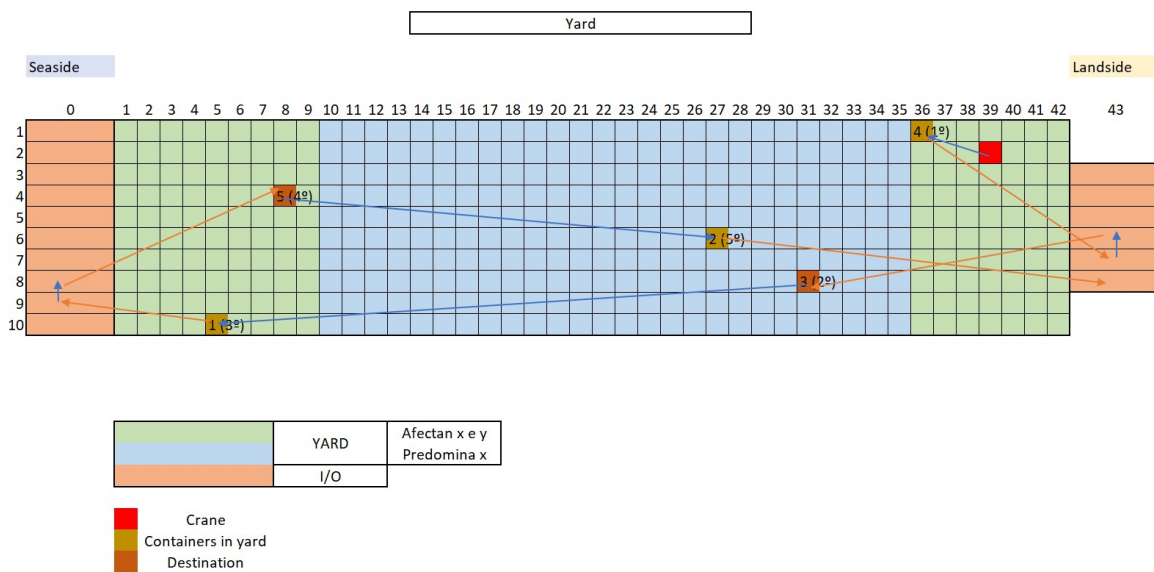


Figura 4.4.1: Esquema de la operación de corregida de la instancia **E\_R1\_S\_NC5\_1**

Y los datos finales del problema quedarían establecidos de la siguiente manera:

ID Contenedor	IO asignado	CG	FG	CO	FO	Tipo	Ubicación (x,y,z)
1	9	71	82	82	82	3	10, 5, 3
2	6	128	149	79	149	4	6, 27, 3
3	4	26	42	10	26	2	8, 31, 4
4	5	6	19	0	19	4	1, 36, 2
5	8	91	105	21	91	1	4, 8, 3

Tabla 4.4.1: Datos finales de las operaciones

ID I/O seaside	Ubicación (R, B, T)	ID I/O landside	Ubicación (R, B, T)
1	4, 0, 1	1	4, 43, 2
2	5, 0, 1		
<b>Inicio Grúa (x, y, z)</b>			
7, 14, 5			

Tabla 4.4.2: Distribución de puntos I/O y grúa en el patio restringido

Donde se puede ver que los puntos I/O de las operaciones 3 y 5 han sido modificados, así como los tiempos del conjunto de las operaciones.

Otros casos en los que se emplea un número más reducido de puntos I/O, y por ende se recurre más a dejar en espera a los vehículos cerca del punto I/O, es en los bloques donde se dispone únicamente de un único punto I/O en el landside y dos puntos I/O en el seaside, como figura en la imagen 4.4.2, y cuyos datos de partida del modelo matemático simplificado son los que figuran en la tabla 4.4.3.

ID Contenedor	IO asignado	CG	FG	CO	FO	Tipo	Ubicación (R, B, T)
1	2	18	31	15	18	1	4, 6, 2
2	1	130	156	6	130	2	5, 23, 2
3	1	44	86	12	44	1	2, 37, 4
4	1	112	124	79	124	4	9, 36, 3
5	1	91	100	83	100	4	1, 39, 3

Tabla 4.4.3: Datos iniciales operación restringida

ID I/O seaside	Ubicación (R, B, T)	ID I/O landside	Ubicación (R, B, T)
1	4, 0, 1	1	4, 43, 2
2	5, 0, 1		
<b>Inicio Grúa (x, y, z)</b>			
7, 14, 5			

Tabla 4.4.4: Distribución de puntos I/O y grúa en el patio restringido

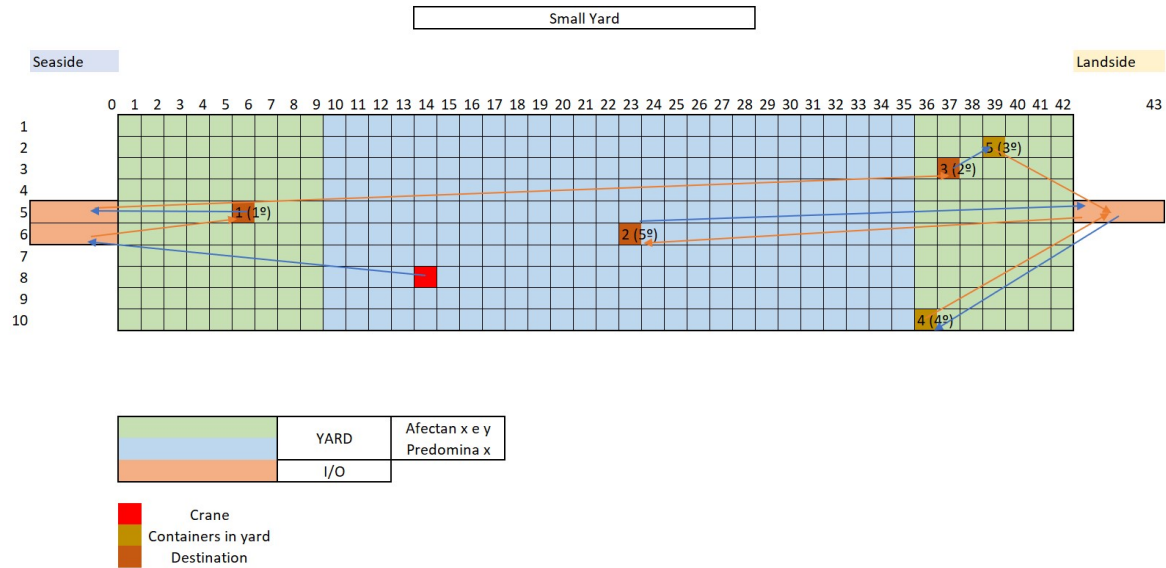


Figura 4.4.2: Esquema de la operación con patio restringido de la instancia **E\_R1\_ST\_NC5\_1**

En este último caso se puede ver como hay tres operaciones que se solapan en el único punto I/O que aparece en el landside, por lo que es necesario dejar en espera a los vehículos del landside para poder realizar las operaciones.

Este ejemplo tan extremo sirve para poner dificultades al algoritmo diseñado y poder comprobar su eficacia en entornos complejos, que permitirán asegurar su robustez al ser aplicados en un entorno real.

## 4.5. Resultados del algoritmo

A la hora de evaluar el algoritmo diseñado se han empleado una gran variedad de instancias con distintos valores en los parámetros iniciales, cuyos costes totales se pueden ver en la tabla 4.5.1. En conjunto el algoritmo ha tenido un buen rendimiento, presentando una desviación media en la función de coste respecto al coste óptimo presentado por el modelo completo de 13,75 y presentando un retardo comprendido entre 1,643 y 2,576 segundos para el cálculo de la solución.

<b>Instancia</b>	<b>Resultado modelo simplificado</b>	<b>Resultado modelo completo</b>	<b>Resultado del algoritmo</b>
<i>E_R1_S_NC5_1</i>	268	274	<b>274</b>
<i>E_R1_S_NC5_2</i>	270	273	<b>273</b>
<i>E_R1_S_NC5_3</i>	498	498	<b>498</b>
<i>E_R1_S_NC5_4</i>	427	429	<b>429</b>
<i>E_R1_S_NC5_5</i>	442	442	<b>442</b>
<i>E_R1_S_NC5_6</i>	415	418	<b>418</b>
<i>E_R1_S_NC5_7</i>	620	623	<b>623</b>
<i>E_R1_S_NC5_8</i>	485	489	<b>489</b>
<i>E_R1_S_NC5_9</i>	483	483	<b>483</b>
<i>E_R4_S_NC5_1</i>	466	468	<b>468</b>
<i>E_R4_S_NC5_2</i>	329	329	<b>329</b>
<i>E_R4_S_NC5_3</i>	498	498	<b>498</b>
<i>E_R4_S_NC5_4</i>	357	360	<b>360</b>
<i>E_R4_S_NC5_5</i>	417	417	<b>417</b>
<i>E_R4_S_NC5_6</i>	496	499	<b>499</b>
<i>E_R4_S_NC5_7</i>	439	445	<b>445</b>
<i>E_R4_S_NC5_8</i>	429	433	<b>433</b>
<i>E_R4_S_NC5_9</i>	474	480	<b>480</b>
<i>E_R1_ST_NC5_1</i>	302	433	<b>443</b>
<i>E_R1_ST_NC5_2</i>	205	363	<b>368</b>
<i>E_R1_ST_NC5_3</i>	274	298	<b>298</b>
<i>E_R1_ST_NC5_4</i>	501	603	<b>620</b>
<i>E_R1_ST_NC5_5</i>	477	490	<b>530</b>
<i>E_R1_ST_NC5_6</i>	402	497	<b>521</b>
<i>E_R1_ST_NC5_7</i>	422	461	<b>577</b>
<i>E_R1_ST_NC5_8</i>	386	438	<b>463</b>
<i>E_R1_ST_NC5_9</i>	456	543	<b>563</b>
<i>E_R4_ST_NC5_1</i>	356	413	<b>420</b>
<i>E_R4_ST_NC5_2</i>	462	558	<b>568</b>
<i>E_R4_ST_NC5_3</i>	322	322	<b>322</b>
<i>E_R4_ST_NC5_4</i>	327	329	<b>329</b>
<i>E_R4_ST_NC5_5</i>	328	391	<b>436</b>
<i>E_R4_ST_NC5_6</i>	401	407	<b>483</b>
<i>E_R4_ST_NC5_7</i>	452	507	<b>550</b>
<i>E_R4_ST_NC5_8</i>	300	312	<b>354</b>
<i>E_R4_ST_NC5_9</i>	387	434	<b>464</b>

Tabla 4.5.1: Comparación de las funciones de coste del modelo simplificado, modelo completo y del algoritmo

A la hora de analizar los resultados la estructura que se va a seguir es la siguiente: En la primera columna se ubica el coste obtenido en la salida del modelo matemático simplificado, el que genera el orden óptimo sin tener en cuenta el solape que se genera en los puntos I/O, en la segunda columna es el resultado que se obtiene del modelo matemático completo, que contempla tanto el orden como la asignación de I/O, y la tercera columna contempla los resultados del modelo simplificado y la heurística que lo arregla.

Hay que tener en cuenta una serie de consideraciones a la hora de evaluar los resultados:

- Los valores de la primera columna corresponden con el coste del problema para el modelo simplificado. Este coste será el **menor posible**, por lo que los costes resultantes de aplicar el modelo completo y el modelo simplificado más la heurística siempre van a ser mayores o iguales que el de la primera columna.
- Las primeras instancias, ubicadas antes de la línea divisoria de la tabla 4.5.1, corresponden a entornos donde no se ha recurrido a dejar en espera a ningún vehículo. En estas situaciones se ha logrado obtener en todos los casos el mismo resultado que el modelo matemático completo, pero empleando un máximo de tres segundos para su cálculo, lo cual implica que la alternativa que emplea la heurística resulta mucho mejor que el modelo completo.
- Las últimas instancias corresponden a entornos en los que se ha tenido que recurrir a dejar vehículos en espera fuera del punto I/O y se ha computado el coste de dicha espera, hasta que podían acceder al punto I/O sin generar más solape. En estos casos se ha conseguido igualar el coste del modelo completo en un menor número de ocasiones. Esto se debe a que el algoritmo propuesto parte del supuesto que la ruta obtenida por el modelo matemático simplificado es la óptima, incluso cuando se tiene en cuenta la asignación de puntos I/O. Esto en ocasiones no es así, dando lugar a las diferencias que se ven en los resultados. Como la heurística parte de este supuesto, no está contemplada la posibilidad de reordenar la ruta óptima ofrecida por el modelo simplificado.

Esta situación ocurre generalmente cuando el modelo simplificado decide dejar para el final operaciones con un valor de ocupación de punto I/O muy elevado, como es el caso de la instancia E\_R1\_ST\_NC5\_7, que corresponde con una diferencia entre CO y FO muy grande. Si no se modifica la ruta estas operaciones generarán una elevada congestión, lo que incrementa drásticamente la función de coste.

- A pesar de no coincidir con el óptimo en varias ocasiones, hay que recordar que conforme crece el número de operaciones los tiempos de cálculo de la solución crecen de manera exponencial, y el modelo completo no es capaz de ofrecer una solución óptima en un tiempo razonable (suele tardar horas y en ocasiones no llega a obtener una solución óptima). Es por eso que la alternativa propuesta de modelo matemático y heurística resulta una mejor solución.

## Capítulo 5

# Conclusiones y propuestas de mejora

A lo largo de la memoria se ha podido ver la importancia del sector del transporte marítimo para las economías y los beneficios asociados de la actividad, los elementos principales de una terminal portuaria y cómo se puede optimizar la actividad para ahorrar recursos y obtener buenos resultados. En esta sección se comentarán las conclusiones obtenidas, las limitaciones encontradas en el desarrollo del trabajo así como posibles propuestas de mejora del trabajo realizado.

### 5.1. Conclusiones

En este trabajo se ha presentado el contexto del transporte marítimo, su importancia para la economía española y valenciana y los factores que han posibilitado su desarrollo actual.

También se ha conseguido enfocar el transporte marítimo en un entorno cercano, como puede ser la nueva terminal portuaria del Puerto de Valencia, presentando las ventajas de su nueva configuración para el desarrollo económico de la Comunidad Valenciana.

Sin embargo, lo más importante es que se ha logrado desarrollar una solución a un problema real en un entorno cercano, como es el problema de secuenciación de grúas en la nueva terminal portuaria que se construirá en el Puerto de Valencia, y esta solución al problema se ha desarrollado empleando herramientas vistas durante el grado en la asignatura de Investigación Operativa.

La solución propuesta combinando el modelo matemático simplificado con la heurística ha obtenido soluciones muy buenas al problema de secuenciación de grúas de la nueva terminal, en un intervalo de tiempo muy reducido, lo que permitirá que se ajuste perfectamente a las necesidades de la nueva terminal. Esto demuestra el gran potencial de la Investigación Operativa y estas dos herramientas en particular para resolver problemas de optimización con grandes resultados en entornos clave para impulsar la productividad, la sostenibilidad y el desarrollo económico.

Además, aplicando los conocimientos en programación se ha logrado desarrollar el programa que permita ejecutar esta solución, para facilitar su aplicación directa una vez la nueva terminal esté disponible.



## 5.2. Propuestas de mejora

En relación a lo que se comentaba en el apartado anterior, existen varias líneas de trabajo que podrían complementar el enfoque que se ha adoptado e incluso mejorarlo:

Por un lado el diseño de algoritmos de optimización portuaria combinando la secuenciación de grúas y el resultado de un problema de localización de contenedores. Este último problema, el de localización de contenedores, ha sido descrito en el apartado de problemas de optimización portuaria y guarda mucha relación con el problema de secuenciación de grúas. La ubicación de los contenedores en la terminal se ha tomado como un valor aleatorio, pero en un entorno real las ubicaciones se determinan teniendo en cuenta las tareas que se van a realizar con esos contenedores. Combinar el problema de secuenciación de grúas con la localización de contenedores permitiría probar la capacidad de los algoritmos en entornos más fieles a la realidad y ser capaz de ofrecer una solución eficiente e integral al desarrollo de las operaciones en la terminal portuaria.

Por otro lado, ya que el enfoque de combinar un modelo matemático con una heurística ha resultado muy provechoso, se podría afrontar el problema empleando una math-heurística. Este concepto implica que en lugar de disponer de una solución que hay que factibilizar con una heurística, que la heurística se encargase de añadir restricciones al modelo, en este caso de la forma de asignar puntos I/O a ciertas operaciones, y que el modelo volviese a recalcular la ruta óptima con esos nuevos datos. Esto resultaría en soluciones más cercanas a la mejor posible para un problema determinado.

# BIBLIOGRAFÍA

- [1] T. H. Cormen, C. E. Leiserson, R. L. Rivest y C. Stein. *Introduction to Algorithms third edition*. The MIT Press, 2009.
- [2] B. J. Cudahy. *Box Boats: How container ships changed the world*. New York: Fordham University Press, 2006.
- [3] A. T. Editor. «Contenedores Marítimos: historia, función y optimización». En: *Australian Economic History Review* (feb. de 2020).
- [4] I. editors. «Python: líder indiscutible de los lenguajes de programación.» En: (2021).
- [5] J. F. Escagiús. «Operaciones de localización de contenedores: desarrollo de métodos para problemas de contenedores en terminales portuarias». En: (2019).
- [6] E. Gómez. «Historia del transporte marítimo». En: *Containers Training S.L. blog* ().
- [7] A. González y J. Collado. «El impacto económico del sector marítimo español: Producción efectiva, valor añadido y empleo». En: (2012).
- [8] M. Hansen. «El transporte marítimo, motor del desarrollo». En: *Diario Sur* ().
- [9] H. H. Hoos y T. Stützle. *Stochastic Local Search: Foundations and applications*. Elsevier, 2005.
- [10] D. S. Jacks y M. Stuermer. «Dry bulk shipping and the evolution of maritime transport costs, 1850–2020». En: *Australian Economic History Review* (2021).
- [11] C. R. López. «Optimización del problema de asignación de contenedores en una terminal portuaria». En: (2019).
- [12] T. Notteboom, A. Pallis y J.-P. Rodrigue. *Port Economics, Management and Policy*. London y New York: Routledge. Taylor Francis Group, 2022.
- [13] A. Nyrkov, A. Shnurenko, S. Sokolov, S. Chernyi y V. Korotkov. «The Effective Optimization Methods of Port Activity on the Basis of Algorithmic Model». En: *International Journal of Electrical and Computer Engineering* 7.6 (2017).
- [14] *Puertos y contaminación marina: la respuesta a los accidentes en las infraestructuras portuarias*. URL: [https://www.puertos.es/es-es/Paginas/AFondo/Contaminacion\\_marina.aspx](https://www.puertos.es/es-es/Paginas/AFondo/Contaminacion_marina.aspx).

- [15] G. P. Sánchez. «El tráfico marítimo, negocio natural en España». En: *Cinco Días* (12 de mar. de 2017).
- [16] *Sustainable development goals: United Nations Development Programme*. URL: <https://www.undp.org/sustainable-development-goals>.
- [17] P. Tae-Woo, O. Kyoung y X. Ruan. «Sustainability Challenges in Maritime Transport and Logistics Industry and its way ahead». En: *Sustainability* 11.5 (2019).
- [18] E. Vallada, J. M. Belenguer, F. Villa y R. Alvarez-Valles. «Models and algorithms for a yard crane scheduling problem in container ports». En: *European Journal of Operational Research* 308.2 (2023).

## Apéndice A

# Anexo I: Códigos desarrollados para generar la heurística

### A.1. Código de acceso

```
1
2 import util
3
4 def corregir_solucion(datos, solucion):
5     """
6     Código principal para detectar y corregir el solape en un conjunto de
7     operaciones de almacenamiento y extracción de contenedores.
8
9     :param datos: Fichero de texto con los datos de partida del problema
10    :param solucion: Fichero de texto con los datos obtenidos del modelo
11                    ↪ matemático
12    :return: operaciones con el solape corregido
13    """
14    operaciones, patio = util.leer_datos(datos, solucion)
15    solucion = util.comprobar_solucion(operaciones, patio)
16
17    return solucion
18
19 if __name__ == '__main__':
20
21    #Carga de los datos y ejecución del método principal
22    datos = "D:\ejemplos\instancias\E_R1_ST_NC5\problema\E_R1_ST_NC5_10.txt"
23    solucion =
24        ↪ "D:\ejemplos\instancias\E_R1_ST_NC5\solucion\E_R1_ST_NC5_10_sal.txt"
25    corregir_solucion(datos, solucion)
```

Código A.1.1: Código principal para acceder a los algoritmos de resolución y carga de datos

## A.2. Código de carga de datos de las operaciones

```

1
2 from typing import List
3 from elementos import Operaciones, Operacion, Patio
4
5 def leer_datos(datos: str, solucion: str):
6     """
7     Lee los datos asociados a una tarea de programación de gruas
8     y los almacena en forma de lista
9     :return: Operaciones realizadas por la grua en el problema
10    """
11
12    with open(datos, "r") as file:
13        # read the lines of the file and strip any whitespace
14        lineas = [line.strip() for line in file.readlines()]
15
16        # split each line into a list of values and convert them to float
17        datos_problema = [[value for value in line.split()] for line in lineas]
18
19    with open(solucion, "r") as file:
20        # read the lines of the file and strip any whitespace
21        lineas = [line.strip() for line in file.readlines()]
22
23        # split each line into a list of values and convert them to float
24        datos_resultado = [[value for value in line.split()] for line in lineas]
25        operaciones = Operaciones(int(datos_problema[4][0]))
26        patio = Patio()
27        patio.create_patio(
28            int(datos_problema[14][0]),
29            int(datos_problema[12][0])
30        )
31        count = 0
32        for io in patio.get_num_io()[0]:
33            patio.set_io_location(io,
34                [int(datos_problema[35 + count][0]),
35                 int(datos_problema[35 + count][1]),
36                 int(datos_problema[35 + count][2])
37                ],
38                "seaside")
39            count += 1
40        count = 0
41        for io in patio.get_num_io()[1]:
42            patio.set_io_location(io,
43                [int(datos_problema[27 + count][0]),
44                 int(datos_problema[27 + count][1]),
45                 int(datos_problema[27 + count][2])
46                ],
47                "landside")
48            count += 1
49        patio.set_initial_position([int(datos_problema[24][0]),
50                                   int(datos_problema[24][1]),
51                                   int(datos_problema[24][2])])

```

```
52
53 # Establecemos los parámetros de las operaciones
54 for i, tarea in enumerate(operaciones.operacion):
55     tarea.set_operacion(
56         int(datos_resultado[10 + i][1]),
57         int(datos_resultado[10 + i][2]),
58         int(datos_resultado[10 + i][3]),
59         int(datos_resultado[10 + i][4]),
60         int(datos_resultado[10 + i][5]),
61         int(datos_problema[48 + i][0]),
62         [
63             int(datos_problema[48 + i][2]),
64             int(datos_problema[48 + i][3]),
65             int(datos_problema[48 + i][4]),
66         ]
67     )
68
69     tarea.set_request([
70         int(datos_problema[48 + i][6]),
71         int(datos_problema[48 + i][7]),
72         int(datos_problema[48 + i][8]),
73         int(datos_problema[48 + i][9]),
74         int(datos_problema[48 + i][10]),
75         int(datos_problema[48 + i][5])
76     ])
77
78 return operaciones, patio
```

Código A.2.1: Código para procesar y almacenar los datos de las operaciones

### A.3. Códigos de detección y corrección de solape

```

1
2 def comprobar_solucion(operaciones: Operaciones, patio: Patio):
3     """
4     Código para detectar el posible solape en un conjunto de operaciones
5     de almacenamiento y extracción de contenedores.
6     :param operaciones: operaciones que se van a realizar.
7     :param patio: patio donde se desarrollan las operaciones.
8     :return: operaciones actualizadas
9     """
10    #Comprobamos el coste de la solución actual
11    calcular_coste(operaciones)
12    data = []
13    for operacion in operaciones.get_operaciones():
14        data.append(operacion.get_data())
15    data.sort(key=lambda x: x[2])
16
17    #Asignamos el orden correspondiente a cada tarea
18    print("Tareas ordenadas")
19    for orden, dato in enumerate(data):
20        dato[8] = orden+1
21        for operacion in operaciones.get_operaciones():
22            if operacion.get_id() == dato[0]:
23                operacion.set_data(dato)
24
25    #Agrupar contenedores según si su IO es de mar o de tierra.
26    mar, tierra = agrupar_mar_tierra(operaciones)
27    mar_agrupado, io_ocupados_mar = agrupar_io(mar)
28    tierra_agrupada, io_ocupados_tierra = agrupar_io(tierra)
29    io_totales_mar, io_totales_tierra = patio.get_num_io()
30
31    #Comprobar solape en el mar:
32    for grupos_io in mar_agrupado:
33        if len(grupos_io) != 1: #Si len == 1 quiere decir que solo hay un
34            ↪ contenedor asignado al IO y por eso no hay solape
35            solape_mar_arreglado = solape_io(grupos_io, io_ocupados_mar,
36            ↪ io_totales_mar)
37            for nueva_operacion in solape_mar_arreglado:
38                for operacion in operaciones.get_operaciones():
39                    if operacion.get_id() == nueva_operacion.get_data()[0]:
40                        operacion.set_data(nueva_operacion.get_data())
41
42    for grupos_io in tierra_agrupada:
43        if len(grupos_io) != 1:
44            solape_tierra_arreglado = solape_io(grupos_io, io_ocupados_tierra,
45            ↪ io_totales_tierra)
46            for nueva_operacion in solape_tierra_arreglado:
47                for operacion in operaciones.get_operaciones():
48                    if operacion.get_id() == nueva_operacion.get_data()[0]:
49                        operacion.set_data(nueva_operacion.get_data())
50
51    calcular_tiempos(operaciones, patio)
52
53    for operacion in operaciones.get_operaciones():
54        print(operacion.get_data())
55    calcular_coste(operaciones)
56    return operaciones

```

Código A.3.1: Código principal para comprobar el solape de la solución

```

1
2 def agrupar_mar_tierra(operaciones: Operaciones):
3     """
4     Agrupa una serie de operaciones ordenadas según su IO.
5     :param: Conjunto de operaciones a agrupar.
6     :return: Listas con los datos de las operaciones de cada lado.
7     """
8     mar = []
9     tierra = []
10    for operacion in operaciones.get_operaciones():
11        print(operacion.get_data())
12        type = operacion.get_data()[6]
13        if type % 2 == 0:
14            tierra.append(operacion)
15        else:
16            mar.append(operacion)
17    print("Contenedores en tierra")
18    for i in tierra:
19        print(i.get_data())
20    print("Contenedores en mar")
21    for i in mar:
22        print(i.get_data())
23    return mar, tierra
24
25 def agrupar_io(datos: List[Operacion]):
26     """
27     Agrupa una serie de operaciones ordenadas según su IO
28     :param datos: Lista con las operaciones que se van a realizar
29     :return: Listas con los datos de las operaciones de cada lado
30     """
31     datos_agrupados = []
32     num_io = set()
33
34     #Se obtienen todos los IO que se han utilizado
35     for operacion in datos:
36         io = operacion.get_data()[1]
37         num_io.update([io])
38
39     #Se añaden a la lista de datos agrupados las operaciones, separando por
40     ↪ nivel de lista las operaciones con el mismo IO
41     for num, io in enumerate(num_io):
42         datos_agrupados.append([])
43         for operacion in datos:
44             io_asignado = operacion.get_data()[1]
45             if io_asignado == io:
46                 datos_agrupados[num].append(operacion)
47
48     return datos_agrupados, num_io
49
50 def solape_io(datos: List[Operacion], io_ocupados: set, io_totales: List[int]):
51     """
52     Detecta si hay solape en una lista de Operaciones y reasigna al io con
53     ↪ menor ocupación.
54     :param datos: Lista con las operaciones individuales que se van a realizar.
55     :param io_ocupados: conjunto de puntos I/O que están ocupados en un lado
56     ↪ del patio.
57     :param io_totales: Lista con todos los punto I/O que hay en un lado del
58     ↪ patio.
59     :return: datos de las operaciones actualizados con los puntos I/O
60     ↪ reasignados.
61     """
62     #Recorremos las operaciones en orden y vamos detectando el solape
63     solape = False

```



```

59
60 #Ordenamos las operaciones
61 datos.sort(key=lambda x: x.get_data()[8])
62
63 #Detectamos solape comparando CO del IO con el intervalo CO,FO del
64     ↪ siguiente contenedor
65 for idx in range(len(datos)-1):
66     op1 = datos[idx].get_data()
67     op2 = datos[idx+1].get_data()
68     if op1[5] <= op2[5] and op1[5] >= op2[4]:
69         print("Existe solape en las operaciones, procediendo a corregir...")
70         op2_corregida = corregir_solape(op2, io_totales, io_ocupados)
71         datos[idx+1].set_data(op2_corregida)
72
73 return datos
74
75 def corregir_solape(op2: List, io_totales:List[int], io_ocupados:set):
76     """
77     Método para corregir el solape existente entre 2 operaciones contiguas.
78     Se reasignará el IO nuevo a la operación que suceda más tarde.
79     :param op2: Segunda operación.
80     :param num_io: Número de IO asignados en este lado del patio.
81     :param io_ocupados: Conjunto de puntos I/O ocupados.
82     :return: Operación con el nuevo IO asignado
83     """
84     #Ordenamos IO en función de la distancia más corta
85     io_ordenados = ordenar_por_distancia(io_totales, op2[1])
86     nuevo_io_asignado = None
87
88     #Elegimos nuevo io asignado
89     for i in io_ordenados:
90         if i not in io_ocupados:
91             nuevo_io_asignado = i
92             break
93
94     if nuevo_io_asignado is None:
95         print("Todos los io están ocupados!")
96         raise ValueError
97
98     op2[1] = nuevo_io_asignado
99     print(f"La operación tiene el nuevo io asignado {nuevo_io_asignado}")
100    print(f"datos de la operación{op2}")
101    return op2
102
103 def ordenar_por_distancia(lista, referencia):
104     """
105     Método auxiliar para ordenar un conjunto de IOs por distancia
106     :param lista: conjunto de io a ordenar
107     :param referencia: io de referencia respecto al cual calcular la distancia
108     :return: lista ordenada
109     """
110    lista_ordenada = sorted(lista, key=lambda x: abs(x - referencia))
111    return lista_ordenada

```

```

111
112 def calcular_tiempos(operaciones: Operaciones, patio:Patio):
113     """
114     Función que permite calcular los tiempos que definen una operación, CG, FG,
115     ↪ CO, FO y actualizar las operaciones.
116     :param operaciones: Conjunto de operaciones de las cuales se va a calcular
117     ↪ los tiempos.
118     :param patio: patio donde se desarrollan las operaciones.
119     """
120     start = True
121     total_operaciones= []
122
123     #Ordenamos las operaciones
124     for operacion in operaciones.get_operaciones():
125         total_operaciones.append([operacion.get_data(),operacion.get_request()])
126     total_operaciones.sort(key=lambda x: x[0][8])
127
128     #Calculamos los tiempos
129     tiempos = 0
130     for datos_operacion, request in total_operaciones:
131         if start is True:
132             crane = patio.get_initial_position()
133             tipo = datos_operacion[6]
134             if tipo <= 2:
135                 nuevos_datos, tiempos = calcular_tiempos_almacenar(tiempos,crane,
136                 ↪ datos_operacion,patio,start,request)
137                 crane = datos_operacion[7]
138                 actualizar_datos(nuevos_datos,operaciones)
139             else:
140                 nuevos_datos, tiempos =
141                 ↪ calcular_tiempos_extraer(tiempos,crane,datos_operacion,patio,start,
142                 ↪ request)
143                 crane = patio.get_io_location(datos_operacion[1],
144                 ↪ datos_operacion[6])
145                 actualizar_datos(nuevos_datos, operaciones)
146
147 def calcular_tiempos_extraer(tiempo: int,
148                             crane: List[int],
149                             datos_operacion: List[int],
150                             patio: Patio,
151                             start: bool,
152                             request: List[int]):
153     """
154     Calcula los tiempos requeridos para ejecutar una operación
155     de tipo 3 o 4, que traen contenedores para almacenarse en
156     el patio.
157     :param tiempo: Tiempo actual de la operación.
158     :param crane: localización actual de la grúa.
159     :param operacion: operación actual que se va a realizar.
160     :param patio: patio donde se desarrolla la actividad.
161     :param request: lista con los datos de los pesos de la operación.
162     :return: operación actualizada con los tiempos adecuados.
163     """
164     rj, dj, ej, wj, wconj, RS = request
165     xcrane = crane[0]
166     ycrane = crane[1]
167     zcrane = crane[2]
168     CG = tiempo
169     xi, yi, zi = datos_operacion[7]

```

```

164
165 #Se calcula el primer intervalo
166 if start:
167     CG += datos_operacion[2]
168     print(f"Nuevo comienzo grúa: {CG}")
169 else:
170     CG += abs(5 - zcrane) + abs(5 - zi) + max(abs(xcrane - xi), abs(ycrane
↪ - yi))
171     print(f"Nuevo comienzo grúa: {CG}")
172
173 #Se calcula el segundo intervalo
174 io = patio.get_io_location(datos_operacion[1], datos_operacion[6])
175 xj = io[0]
176 yj = io[1]
177 zj = io[2]
178 t2 = abs(5 - zi) + abs(5 - zj) + max(abs(xi - xj), abs(yi - yj)) + 2 * RS
179 FG = CG + t2
180 print(f"Nuevo final grúa: {FG}")
181
182 #Se establecen los nuevos datos en las operaciones
183 datos_operacion[2] = CG
184 if datos_operacion[3] == datos_operacion[5]:
185     datos_operacion[5] = FG #Final ocupación IO coincide con final grúa
186 if datos_operacion[6] == 3:
187     datos_operacion[4] = FG #Comienzo ocupación IO coincide con final grúa
188 datos_operacion[3] = FG
189
190 return datos_operacion, FG
191
192 def calcular_tiempos_almacenar(tiempo: int, crane: List[int],
193                               datos_operacion: List[int],
194                               patio: Patio,
195                               start: bool,
196                               request: List[int]):
197     """
198     Calcula los tiempos requeridos para ejecutar una operación
199     de tipo 1 o 2, que extrae contenedores del patio hacia
200     tierra o mar.
201     :param tiempo: tiempo actual de la operación.
202     :param crane: localización actual de la grúa.
203     :param datos_operacion: operación actual que se va a realizar.
204     :param patio: patio donde se desarrolla la actividad.
205     :param start: indica si es la operación inicial.
206     :param request: lista con los datos de los pesos de la operación.
207     :return: operación actualizada con los tiempos adecuados.
208     """
209     rj, dj, ej, wj, wconj, RS = request
210     xcrane = crane[0]
211     ycrane = crane[1]
212     zcrane = crane[2]
213     CG = tiempo
214     io = patio.get_io_location(datos_operacion[1], datos_operacion[6])
215     xi = io[0]
216     yi = io[1]
217     zi = io[2]
218
219     #Se calcula el primer intervalo
220     if start:
221         CG += datos_operacion[2]
222         print(f"Nuevo comienzo grúa: {CG}")

```

```

223
224     else:
225         CG += abs(5 - zcrane) + abs(5 - zi) + max(abs(xcrane - xi), abs(ycrane
↪ - yi))
226         if CG >= rj:
227             print(f"Nuevo comienzo grúa: {CG}")
228         else:
229             CG = rj
230             print(f"Nuevo comienzo grúa: {CG}")
231
232     xj, yj, zj = datos_operacion[7]
233
234     #Se calcula el segundo intervalo
235     t2 = abs(5 - zi) + abs(5 - zj) + max(abs(xi - xj), abs(yi - yj))
236     FG = CG + t2
237     print(f"Final grúa {FG}")
238
239     #Se establecen los datos de las operaciones
240     datos_operacion[2] = CG #Establecemos comienzo grúa
241     datos_operacion[3] = FG #Establecemos final grúa
242     datos_operacion[5] = CG #Ya que en operaciones 1 y 2 CG igual a FO
243
244     return datos_operacion, FG
245 def actualizar_datos(datos_operacion: List[int], operaciones:Operaciones):
246     """
247     Método para actualizar los datos de la operación.
248     :param datos_operacion: nuevos datos.
249     :param operacion: operación a actualizar.
250     """
251     for operacion in operaciones.get_operaciones():
252         if operacion.get_id() == datos_operacion[0]:
253             operacion.set_data(datos_operacion)
254
255 def calcular_coste(operaciones: Operaciones):
256     """
257     Calcula el coste de ejecutar un conjunto de operaciones.
258     :param operaciones: Operaciones a las que se va a calcular el coste.
259     :return: Coste de las operaciones.
260     """
261     cost = 0
262     for operacion in operaciones.get_operaciones():
263         datos_operacion = operacion.get_data()
264         CG = datos_operacion[2]
265         FG = datos_operacion[3]
266         CO = datos_operacion[4]
267         FO = datos_operacion[5]
268         rj, dj, ej, wj, wconj, RS = operacion.get_request()
269         if datos_operacion[6] == 1 or datos_operacion[6] == 2:
270             cost += wj * (FG - rj)
271         elif datos_operacion[6] == 3:
272             cost += wj * (FO - dj)
273         else:
274             cost += wj * (FG - ej)
275     print(f"El coste de la operación es {cost}")

```

Código A.3.2: Métodos auxiliares empleados en el proceso de corrección del solape

## A.4. Código que modela todos los elementos empleados en la operación

```
1 from typing import List
2
3 class Patio:
4     def __init__(self):
5         """
6         Clase definitoria del patio donde se van a almacenar y
7         extraer los contenedores
8         """
9         self.idx_io_seaside = None
10        self.idx_io_landside = None
11        self.io_location_seaside = {}
12        self.io_location_landside = {}
13
14        def create_patio(self, io_sea: int, io_land: int):
15            """
16            Crea un patio a partir de una serie de datos extraídos
17            de un fichero de texto. Almacena los índices de los IO
18            a los que se pueden asignar los contenedores.
19            """
20            self.idx_io_seaside = list(range(1, io_sea+1))
21            self.idx_io_landside = list(range(1, io_land+1))
22
23            def set_io_location(self, io_id: int, location: List[int], keyword: str):
24                """
25                Establece la ubicación de los punto Input Output del patio
26                :param sea_location: Ubicación de los IO del seaside
27                :param land_location: Ubicación de los IO del landside
28                """
29                if keyword is "seaside":
30                    self.io_location_seaside[str(io_id)] = location
31                if keyword is "landside":
32                    self.io_location_landside[str(io_id)] = location
33            def get_io_location(self, io_id:int, type: int):
34                """
35                Obtiene la ubicación de un io dado su identificador y el tipo de
36                operación
37                :param io_id: ID del punto IO
38                :param type: tipo de operación que se realiza
39                :return: ubicación del io con sus coordenadas x,y,z
40                """
41
42
43                if type % 2 == 0:
44                    location = self.io_location_landside.get(str(io_id))
45                else:
46                    location = self.io_location_seaside.get(str(io_id))
47
48                return location
49
50            def get_num_io(self):
51                """
52                Devuelve el número de los IO a los cuales se puede asignar
53                un contenedor en un patio
54                :return: número de io en mar y tierra
55                """
56                return self.idx_io_seaside, self.idx_io_landside
```

```
57
58     def set_initial_position(self, location: List[int]):
59         """
60         Establece la posición inicial de la grúa
61         :param location: posición inicial de la grúa
62         """
63         self.crane_location = location
64     def get_initial_position(self):
65         """
66         Obtiene la posición inicial de la grúa
67         :return: Posición inicial de la grúa
68         """
69         return self.crane_location
70
71 class Operacion:
72     def __init__(
73         self,
74         contenedor: int,
75     ):
76         """
77         Clase definitoria de las tareas que se van a realizar y si
78         procede ordenar.
79
80         :param contenedor: Número del contenedor asociado a una tarea.
81         """
82         self.contenedor = contenedor
83         self.IO = None
84         self.CG = None
85         self.FG = None
86         self.CO = None
87         self.FO = None
88         self.type = None
89         self.ubicacion = None
90         self.orden = None
91
92     def set_operacion(
93         self,
94         IO: int,
95         CG: int,
96         FG: int,
97         CO: int,
98         FO: int,
99         type: int,
100        ubicacion: List[int]
101    ) -> None:
102        """
103        Método para definir las tareas.
104
105        :param IO: Input/Output asignado.
106        :param CG: Comienzo del movimiento de la grua.
107        :param FG: Final del movimiento de la grua.
108        :param CO: Comienzo de la ocupación del IO.
109        :param FO: Final de la ocupación del IO.
110        :param type: Tipo de operación (TypeLoc está incluido).
111        :param ubicacion: Posición dentro del patio.
112        """
113        self.IO = IO
114        self.CG = CG
115        self.FG = FG
116        self.CO = CO
117        self.FO = FO
118        self.type = type
119        self.ubicacion = ubicacion
120        self.orden = None
```

```
121
122     def set_data(self, datos: List):
123         """
124         Establece los nuevos datos correspondientes al contenedor.
125         El orden que siguen los datos de entrada tiene que ser el mismo
126         con el que están definidos en la clase Operacion.
127         :param datos: Datos asociados a una operación con un contenedor.
128         """
129         self.contenedor = datos[0]
130         self.IO = datos[1]
131         self.CG = datos[2]
132         self.FG = datos[3]
133         self.CO = datos[4]
134         self.FO = datos[5]
135         self.type = datos[6]
136         self.ubicacion = datos[7]
137         self.orden = datos[8]
138     def get_data(self):
139         """
140         Devuelve una lista con todos los datos asociados a una operacion.
141         :return: Lista con los datos asociados a una operación.
142         """
143         return [
144             self.contenedor,
145             self.IO,
146             self.CG,
147             self.FG,
148             self.CO,
149             self.FO,
150             self.type,
151             self.ubicacion,
152             self.orden,
153         ]
154     def get_id(self):
155         """
156         Método que devuelve el identificador de un contenedor dado.
157         :return: ID del contenedor.
158         """
159         return self.contenedor
160     def set_request(self, datos: List):
161         """
162         Establece el objetivo de dicha operación.
163         """
164         self.rj = datos[0]
165         self.dj = datos[1]
166         self.ej = datos[2]
167         self.wj = datos[3]
168         self.wconj = datos[4]
169         self.Res = datos[5]
170
171     def get_request(self):
172         """
173         Devuelve el objetivo de dicha operación.
174         :return: pesos de la operación.
175         """
176         return [
177             self.rj,
178             self.dj,
179             self.ej,
180             self.wj,
181             self.wconj,
182             self.Res
183         ]
```

```

184
185 class Operaciones:
186     def __init__(self, numTareas: int):
187         """
188         Conjunto de las operaciones que se van a realizar y en su caso.
189         ordenar.
190         :param numTareas: Número de tareas a realizar.
191         """
192         self.operacion = []
193         for i in range(numTareas):
194             self.operacion.append(Operacion(i+1))
195     def get_operaciones(self):
196         """
197         Devuelve las operaciones realizadas en un problema de scheduling.
198         :return: operaciones realizadas.
199         """
200         return self.operacion

```

Código A.4.1: Código de los elementos empleados en el algoritmo

```

1 def corregir_solape(op1: List, op2: List, io_totales:List[int],
2     ↪ io_ocupados:set):
3     """
4     Método para corregir el solape existente entre 2 operaciones contiguas.
5     Se reasignará el IO nuevo a la operación que suceda más tarde.
6     :param op2: Segunda operación
7     :param patio: Tipo de patio donde se desarrolla la actividad
8     :param num_io: Número de IO asignados en este lado del patio
9     :return: Operación con el nuevo IO asignado
10    """
11    print(io_totales)
12
13    #Ordenamos IO en función de la distancia más corta
14    io_ordenados = ordenar_por_distancia(io_totales, op2[1])
15    print(io_ordenados)
16
17    nuevo_io_asignado = None
18    #Elegimos nuevo io asignado
19    for i in io_ordenados:
20        if i not in io_ocupados:
21            nuevo_io_asignado = i
22            break
23
24    if nuevo_io_asignado is None:
25        nuevo_io_asignado = op2[1]
26        print("Todos los io están ocupados!")
27        if op2[6] == 1 or op2[6] == 2:
28            op2[9] = 1
29
30
31    op2[1] = nuevo_io_asignado
32    print(f"La operación tiene el nuevo io asignado {nuevo_io_asignado}")
33    print(f"datos de la operación{op2}")
34    return op2, op1

```

Código A.4.2: Modificación principal en el código para añadir los tiempos de espera en puntos I/O





**ANEXO I. RELACIÓN DEL TRABAJO CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE DE LA AGENDA 2030**

**Anexo al Trabajo de Fin de Grado y Trabajo de Fin de Máster: Relación del trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la agenda 2030.**

Grado de relación del trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

<b>Objetivos de Desarrollo Sostenibles</b>	<b>Alto</b>	<b>Medio</b>	<b>Bajo</b>	<b>No Procede</b>
ODS 1. <b>Fin de la pobreza.</b>				
ODS 2. <b>Hambre cero.</b>				
ODS 3. <b>Salud y bienestar.</b>				
ODS 4. <b>Educación de calidad.</b>				
ODS 5. <b>Igualdad de género.</b>				
ODS 6. <b>Agua limpia y saneamiento.</b>				
ODS 7. <b>Energía asequible y no contaminante.</b>				
ODS 8. <b>Trabajo decente y crecimiento económico.</b>				
ODS 9. <b>Industria, innovación e infraestructuras.</b>				
ODS 10. <b>Reducción de las desigualdades.</b>				
ODS 11. <b>Ciudades y comunidades sostenibles.</b>				
ODS 12. <b>Producción y consumo responsables.</b>				
ODS 13. <b>Acción por el clima.</b>				
ODS 14. <b>Vida submarina.</b>				
ODS 15. <b>Vida de ecosistemas terrestres.</b>				
ODS 16. <b>Paz, justicia e instituciones sólidas.</b>				
ODS 17. <b>Alianzas para lograr objetivos.</b>				

Descripción de la alineación del TFG/TFM con los ODS con un grado de relación más alto.

\*\*\*Utilice tantas páginas como sea necesario.



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

ADE

Facultat d'Administració  
i Direcció d'Empreses /UPV

**Anexo al Trabajo de Fin de Grado y Trabajo de Fin de Máster: Relación del trabajo con los  
Objetivos de Desarrollo Sostenible de la agenda 2030.** (Numere la página)