

UNIVERSIDAD DIEGO PORTALES



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS

PROPUESTA: SISTEMA DE PLANIFICACIÓN DE ATRAQUE PORTUARIO RESILIENTE

Autores:

Pablo Castro

Cristóbal Sagredo

David Silva

Leonardo Rojas

Diciembre 2024

1. Introducción

La planificación eficiente de los atraques en puertos de gran envergadura, como el puerto de San Antonio en Chile, representa un desafío logístico crucial. Este puerto es un nodo estratégico en la cadena de suministro del país, conectando el transporte marítimo con el terrestre y facilitando el flujo de bienes tanto a nivel nacional como internacional. Sin embargo, el aumento sostenido en la demanda de operaciones portuarias y el creciente volumen de importaciones y exportaciones han revelado la necesidad de optimizar los procesos de planificación de atraques y de desarrollar estrategias efectivas para la re planificación frente a cierres de puertos.

El problema de asignación de muelle (Berth Allocation Problem, BAP) es uno de los principales retos en la logística portuaria. Este problema se centra en la asignación óptima de los sitios de atraque para las embarcaciones que arriban al puerto, con el objetivo de minimizar los tiempos de espera y maximizar el uso eficiente de recursos clave, como muelles y grúas. En entornos dinámicos como el puerto de San Antonio, eventos imprevistos, como condiciones meteorológicas adversas o retrasos en la llegada de los buques, pueden alterar significativamente los planes de atraque establecidos. Esto recalca la importancia de contar con sistemas resilientes capaces de ajustarse rápidamente a estas nuevas condiciones operativas.

En este trabajo, se presenta el desarrollo de un sistema de planificación de atraques portuarios resiliente, diseñado para enfrentar disrupciones y mantener altos niveles de eficiencia operativa. Este sistema integra modelos matemáticos de optimización, basados en programación lineal entera mixta (MILP), y técnicas de horizonte rodante para adaptarse dinámicamente a los cambios en las condiciones operativas. El enfoque busca minimizar las desviaciones respecto a la planificación inicial, reduciendo los costos asociados a los cambios en los planes y asegurando un funcionamiento continuo del puerto.

El documento está estructurado de manera que introduce al lector en el dominio del problema portuario, explicando los conceptos clave y el contexto del BAP. A continuación, se detallan los objetivos alcanzados y el modelo desarrollado, seguido de un análisis de las soluciones implementadas y su desempeño frente a los retos planteados. Finalmente, se comparan los resultados obtenidos con las estrategias sugeridas en la literatura, evaluando la capacidad del sistema para adaptarse a condiciones desafiantes y dinámicas.

2. Usuario

El principal usuario del sistema de planificación portuaria es la concesionaria DP World en el puerto de San Antonio, uno de los puertos más grandes y relevantes de Chile, que cumple un rol estratégico como nodo logístico en la conexión entre el transporte

marítimo y terrestre. Este puerto es clave en la cadena de suministro, considerando tanto la importación como la exportación de material nacional e internacional. La operación del puerto contempla la recepción de contenedores, importación y exportación de graneles, y de contenedores con carga y vacíos, además de vehículos y pasajeros.

Este sistema está compuesto por diferentes actores, entre los que se incluyen líneas navieras, encargadas del transporte de mercancías por mar, y operadores de terminales, que gestionan y organizan las operaciones en el puerto, como la carga y descarga de los barcos. Estos actores colaboran para asegurar que el puerto se mantenga operativo, con el importante desafío de maximizar el uso de los recursos disponibles (sitios de atraque, grúas, personal operativo).

2.1. Conceptos claves

Estos conceptos ayudarán entender aun mejor el contexto del usuario y del problema a tratar.

1. **Sistema Portuario:** Un puerto es un punto intermodal entre el transporte marítimo y terrestre, conectando las cadenas de producción globales y regionales con los mercados de consumo. Los puertos se dividen en zonas según su proximidad al muelle (primera, segunda y tercera líneas portuarias), y tienen diferentes actores involucrados como consignatarios, aduanas, aseguradoras y empresas estibadoras (Rafaela Andargón, 8).
2. **Comercio Exterior (COMEX):** Involucra la importación y exportación de bienes que circulan a través de los puertos. La mayoría del comercio en Chile ocurre por vía marítima, lo que refuerza la importancia de los puertos como usuarios principales de cualquier sistema de planificación (Rafaela Andargón, 6).
3. **Cadena Logística Portuaria:** Abarca todas las etapas y procesos necesarios para mover productos desde su origen hasta su destino, pasando por almacenamiento, transporte y custodia. El puerto es un actor clave dentro de esta cadena, facilitando el intercambio entre transporte marítimo y terrestre (Rafaela Andargón, 8-9).
4. **Líneas Navieras:** Son los actores principales que operan los barcos que transportan la carga. Las navieras pueden operar bajo acuerdos de servicio fijo o mediante alianzas, lo que requiere una planificación detallada para optimizar el uso del espacio de atraque (Rafaela Andargón, 13-14).
5. **Terminal Operator System (TOS):** Este sistema de información computacional es fundamental para la coordinación de las actividades portuarias. Un sistema de planificación de atraque resiliente tendría que integrarse o complementarse con estos sistemas para manejar la carga, las operaciones marítimas y la gestión de recursos portuarios (Rafaela Andargón, 18).
6. **Eslora:** se refiere a la longitud total de un barco, desde la proa hasta la popa.
7. **Tipos de Carga:**
 - **Carga General:** Es la carga fraccionada o “break bulk”, que incluye mercancías que se transportan en paquetes y no en contenedores, ya sea por sus

dimensiones o por preferencia del cliente. Dentro de la categoría de carga general, existe una subclasificación llamada “neo bulk”, que se refiere a cargas generales que, sin estar empaquetadas, se cuentan como una unidad, como los vehículos Ro-ro (Roll-on/Roll-off), rollos de papel o acero (Rafaela Andar-goña).

- **Carga a Granel:** Se clasifica en:
 - **Granel sólido limpio:** Productos como cereales o ciertos materiales de construcción que no presentan características contaminantes.
 - **Granel sólido sucio:** Incluye productos como el carbón, minerales o algunos materiales de construcción que requieren tratamiento especial por sus características contaminantes.
 - **Granel líquido:** Como petróleo, químicos, o productos alimenticios líquidos.

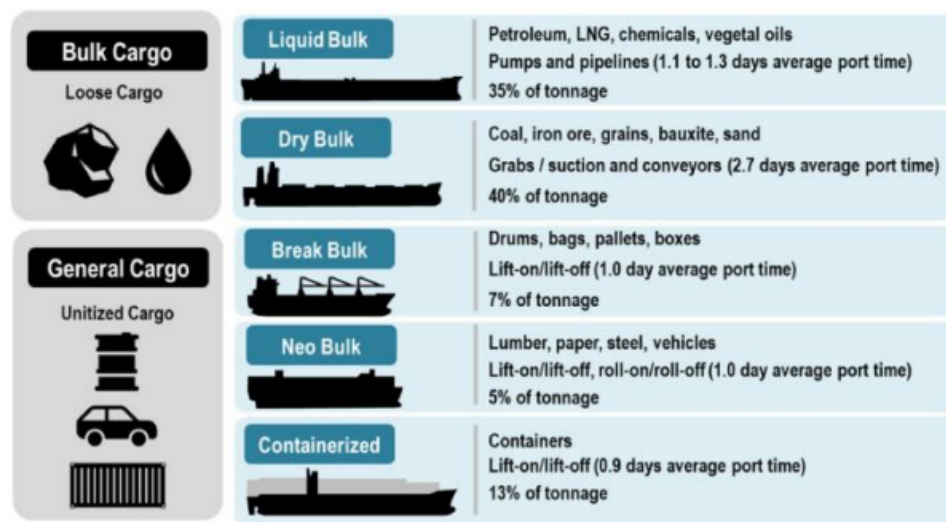


Figura 1: Tipo de carga marítima.

Fuente: *Rodríguez (2020).*

8. Tipos de Embarcaciones:

- **Ro-Ro (Roll-on/Roll-off):** Embarcaciones diseñadas para transportar vehículos rodados (como automóviles, camiones, etc.).
- **PCC (Pure Car Carrier):** Barcos especializados en el transporte de automóviles.
- **Naves de Pasajeros:** Embarcaciones que transportan pasajeros y requieren una infraestructura especial en los puertos para su correcto manejo.
- **Graneleros Sólidos:** Naves especializadas en transportar cargas a granel sólidas, como cereales y minerales.
- **Graneleros Líquidos:** Embarcaciones que transportan cargas líquidas, como productos químicos y petróleo.
- **Portacontenedores:** Buques diseñados específicamente para el transporte de contenedores de 20 y 40 pies.

2.2. Restricción

Para conocer mejor el problema y la naturaleza del usuario, también es necesario saber que está sujeto a ciertas restricciones que pueden afectar tanto al modelo matemático como al contexto en el que este se aplica. Dentro de estas restricciones se encuentran las siguientes.

Tipos de Variables:

1. **Restricciones espaciales y físicas:** Estas están relacionadas con la capacidad del puerto en términos de metros lineales disponibles en los muelles y las características físicas de las naves, como el tamaño, calado y tipo de carga. No todas las naves pueden ser atendidas en todos los sitios debido a estas limitaciones físicas y de infraestructura.
2. **Restricciones temporales:** Estas incluyen la hora de llegada prevista de las naves y las ventanas de tiempo para cada operación. El terminal evalúa constantemente posibles retrasos, lo cual afecta el tiempo disponible en los sitios de atraque y la planificación de los turnos de trabajo
3. **Restricciones meteorológicas:** Condiciones climáticas como marejadas, vientos y neblina pueden impedir las maniobras de atraque o desatraque.
4. **Restricciones reglamentarias:** Las reglas para el uso de los muelles están basadas en criterios establecidos que aseguran que no se realicen maniobras simultáneas en sitios cercanos. Estas reglas también priorizan la atención de las naves según acuerdos contractuales y el orden de llegada.
5. **Restricciones sociales:** Movilizaciones sindicales, como huelgas o paros, pueden impactar significativamente las operaciones del puerto, retrasando la carga, descarga y maniobras de las naves. Estas situaciones deben considerarse en la planificación debido a su potencial para alterar los cronogramas establecidos. En el manual de servicios se encuentra el orden de prioridad según los siguientes criterios:

SITIO 4 y 5

Prioridad	Criterio
1 ^a	Naves de pasajeros con Contrato de Reserva.
2 ^a	Naves PCC o PCTC con Contrato de Reserva.
3 ^a	Naves de carga fraccionada (excluye carga hortofrutícola) con Contrato de Reserva.
4 ^a	Naves de graneles (sólidos o líquidos) con Contrato de Reserva.
5 ^a	Otras naves con Contrato de Reserva.
Si no hay naves con contrato de reserva, se asignan condicionalmente en el siguiente orden:	
6 ^a	Naves PCC o PCTC sin Contrato de Reserva.
7 ^a	Naves de carga fraccionada sin Contrato de Reserva.
8 ^a	Naves de pasajeros sin Contrato de Reserva.
9 ^a	Naves de graneles sin Contrato de Reserva.
10 ^a	Otras naves sin Contrato de Reserva.

Fuente: *Manual de los Servicios - Puerto Central S.A. (2021).*

SITIO 6 y 7

Prioridad	Criterio
1 ^a	Naves de pasajeros con Contrato de Reserva.
2 ^a	Naves de graneles con Contrato de Reserva.
3 ^a	Naves de carga fraccionada (excluye hortofrutícola) con Contrato de Reserva.
4 ^a	Otras naves con Contrato de Reserva.
Si no hay naves con contrato de reserva, se asignan condicionalmente en el siguiente orden:	
5 ^a	Naves de graneles sin Contrato de Reserva.
6 ^a	Naves de pasajeros sin Contrato de Reserva.
7 ^a	Naves de carga fraccionada sin Contrato de Reserva.
8 ^a	Otras naves sin Contrato de Reserva

Fuente: *Manual de los Servicios - Puerto Central S.A. (2021).*

SITIO COSTANERA NORTE

Prioridad	Criterio
1 ^a	Naves Contenedores con Contrato de Reserva de Sitio.
2 ^a	Naves de Pasajeros con Contrato de Reserva de Sitio.
3 ^a	Naves PCC o PCTC con Contrato de Reserva de Sitio.
4 ^a	Naves de Carga Fraccionada (excluye carga hortofrutícola) con Contrato de Reserva.
5 ^a	Naves de Graneles (sólidos o líquidos) con Contrato de Reserva.
6 ^a	Otras Naves con Contrato de Reserva.
Si no hay naves con contrato de reserva, se asignan condicionalmente en el siguiente orden:	
7 ^a	Naves Contenedores sin Contrato de Reserva de Sitio.
8 ^a	Naves de Carga Fraccionada sin Contrato de Reserva.
9 ^a	Naves de Graneles sin Contrato de Reserva.
10 ^a	Naves PCC o PCTC sin Contrato de Reserva.

SITIO COSTANERA SUR

Prioridad	Criterio
1 ^a	Naves de Pasajeros con Contrato de Reserva de Sitio.
2 ^a	Naves Contenedores con Contrato de Reserva de Sitio.
3 ^a	Naves de Graneles con Contrato de Reserva (subprioridades para Clinker, ácido sulfúrico)
4 ^a	Naves PCC o PCTC con Contrato de Reserva de Sitio.
5 ^a	Naves de Carga Fraccionada (excluye carga hortofrutícola) con Contrato de Reserva.
6 ^a	Otras Naves con Contrato de Reserva.
Si no hay naves con contrato de reserva, se asignan condicionalmente en el siguiente orden:	
7 ^a	Naves Contenedores sin Contrato de Reserva.
8 ^a	Naves de Graneles sin Contrato de Reserva.
9 ^a	Naves de Carga Fraccionada sin Contrato de Reserva.

Fuente: *Manual de los Servicios - Puerto Central S.A. (2021).*

2.3. Principales Funciones

1. **Planificación y Replanificación de Atraques:** El usuario es responsable de asignar y gestionar el uso de los muelles de atraque para las distintas naves que arriban al puerto. Este proceso incluye priorizar las naves de acuerdo con su tipo (por ejemplo, naves de pasajeros, contenedores, graneleros) y su importancia estratégica o contractual. En situaciones de interrupciones, como cierres del puerto debido a eventos marítimos o condiciones meteorológicas adversas, estos usuarios deben replanificar las operaciones de atraque, minimizando los cambios en la programación original para reducir el impacto operativo.
2. **Gestión de Restricciones Operativas:** El usuario debe gestionar restricciones específicas del puerto, como los calados de los buques, las longitudes de los muelles y la disponibilidad de grúas y otros equipos. Además, debe equilibrar estas restricciones con la capacidad del puerto y las necesidades logísticas de cada nave para optimizar el flujo de operaciones.
3. **Monitoreo y Comunicación:** Una de las funciones importantes del usuario es el monitoreo continuo de las operaciones y las condiciones del puerto. Utilizan sistemas de monitoreo en tiempo real como medidores de nivel del mar, viento, etc. para detectar interrupciones o cambios que afecten la operativa, además de comunicarse de manera eficaz con todos los actores involucrados, como las líneas navieras, autoridades portuarias y operadores logísticos.
4. **Priorización de Naves:** Dado que no todas las naves tienen la misma importancia o urgencia, el usuario debe asignar prioridades según si tienen contrato y en base al tipo de carga que llevan.

2.4. Entorno de Trabajo del Usuario

El entorno de trabajo del usuario, el Senior Vessel Planner de DP World San Antonio (DPW SAI), se caracteriza por ser un espacio de alta complejidad y dinamismo, donde se deben gestionar múltiples operaciones simultáneamente bajo condiciones de incertidumbre. Este puerto, como nodo logístico clave en la cadena de suministro de Chile, enfrenta desafíos constantes debido a su creciente volumen de operaciones y a la diversidad de cargas que maneja, tales como contenedores, graneles líquidos y sólidos, carga general y vehículos.

Actualmente, el usuario opera en un entorno sujeto a frecuentes interrupciones, tales como cierres temporales de puerto por condiciones meteorológicas adversas (marejadas, vientos fuertes, neblinas) y congestión logística derivada de la alta demanda de atraque. Estas interrupciones afectan directamente la planificación de las operaciones portuarias, obligando al Senior Vessel Planner a realizar ajustes rápidos en los planes de atraque, lo cual genera un impacto en los tiempos de espera de las naves, en la utilización de recursos (muelles, grúas, personal) y en los costos operativos asociados.

El usuario depende de sistemas de gestión como el *Terminal Operator System* (TOS) para coordinar las actividades diarias, pero la necesidad de una respuesta rápida y eficiente ante eventos disruptivos es un desafío vigente. Por ejemplo, cuando se produce una

interrupción debido a un cierre de puerto, los planes de atraque deben ser reconfigurados de manera que se minimice el impacto en las operaciones y se mantenga el flujo de mercancías. Sin embargo, la replanificación actual no siempre es capaz de minimizar las diferencias con el plan original, lo cual puede generar mayores costos y tiempos de espera.

2.5. Condiciones de Atraque

A continuación, se presentarán las condiciones específicas para cada sitio de atraque en el puerto de San Antonio, pero antes, algunos conceptos clave para su comprensión:

- **Extensión:** Es la longitud total del muelle o sitio de atraque disponible para recibir un barco. Esto es importante para asegurarse de que el sitio pueda acomodar completamente la longitud de la embarcación.
- **Manga máxima:** Se refiere al ancho máximo de los barcos que pueden atracar en ese sitio. Este parámetro está determinado, en mayor parte, por el alcance de las grúas del puerto, lo que es crucial para evitar problemas de espacio entre barcos o con el muelle y garantizar operaciones eficientes.
- **Desplazamiento máximo:** Es el peso máximo que el barco puede tener, incluyendo la carga, y que puede ser soportado por el sitio de atraque sin comprometer la seguridad o la operatividad.
- **Longitud utilizable:** Indica la longitud del muelle que puede ser efectivamente utilizada para atracar barcos. Esta longitud puede ser menor que la extensión total debido a limitaciones físicas o de operación.
- **Calado máximo:** Se refiere a la profundidad máxima del agua que puede aceptar un barco en el sitio de atraque. El calado de un barco es la distancia desde la línea de flotación hasta la parte más baja de la quilla (la base del barco).
- **Eslora máxima:** Es la longitud total del barco, medida desde la proa hasta la popa (es decir, de extremo a extremo).
- **Carga:** Hace referencia al tipo de mercancía que puede manejarse en el sitio de atraque. Esto incluye contenedores, granel sólido (como minerales o granos), granel líquido (como petróleo o productos químicos), RoRo, pasajeros y carga general.

2.5.1. Concesionaria STI

- **Sitio 1:**
 - Extensión: 363 metros
 - Manga máxima: 48,4 metros
 - Desplazamiento máximo: 149.000 toneladas
 - Longitud utilizable: 363 metros
 - Calado máximo: 14 metros
 - Eslora máxima: 363 metros
 - Carga: Contenedores, granel sólido, general

■ **Sitio 2:**

- Extensión: 337 metros
- Manga máxima: 42,8 metros
- Desplazamiento máximo: 106.000 toneladas
- Longitud utilizable: 337 metros
- Calado máximo: 14 metros
- Eslora máxima: 337 metros
- Carga: Contenedores, granel sólido, general

■ **Sitio 3:**

- Extensión: 253 metros
- Manga máxima: 32,2 metros
- Desplazamiento máximo: 46.703 toneladas
- Longitud utilizable: 253 metros
- Calado máximo: 45,549 metros
- Eslora máxima: 253 metros
- Carga: Contenedores, granel líquido, granel sólido, general

Fuente: ver [7].

2.5.2. Concesionaria DPWORLD

■ **Sitio 4-5:**

- Extensión: 240,30 metros
- Manga máxima: 32,20 metros
- Desplazamiento máximo: 55.600 toneladas
- Longitud utilizable: 237 metros
- Calado máximo: 11,3 metros
- Eslora máxima: 237 metros
- Carga: General

■ **Sitio 6-7:**

- Extensión: 321 metros
- Manga máxima: 32,20 metros
- Desplazamiento máximo: 45.000 toneladas
- Longitud utilizable: 225 metros
- Calado máximo: 14 metros
- Eslora máxima: 225 metros
- Carga: Granel sólido, general

■ **Costanera Norte:**

- Extensión variable: 700 metros compartidos con Costanera Sur
- Manga máxima: 48,2 metros
- Desplazamiento máximo: 163,000 toneladas
- Longitud utilizable: 700 metros
- Calado máximo: 14,10 metros
- Eslora máxima: 367 metros
- Carga: Contenedores, granel líquido, granel sólido, general

■ **Costanera Sur:**

- Extensión variable: 700 metros compartidos con Costanera Norte
- Manga máxima: 48,2 metros
- Desplazamiento máximo: 163.000 toneladas
- Longitud utilizable: 700 metros
- Calado máximo: 14,10 metros
- Eslora máxima: 367 metros
- Carga: Contenedores, granel líquido, granel sólido, general

Fuente: ver [8].

2.5.3. Concesionaria Puerto Panul

■ **Sitio 8:**

- Extensión: 186 metros
- Manga máxima: 32,20 metros
- Desplazamiento máximo: 60.000 toneladas
- Longitud utilizable: 186 metros
- Calado máximo: 11 metros
- Eslora máxima: 230 metros
- Carga: Granel solido

Fuente: ver [9].

2.5.4. Puerto Policarpo Toro

■ **Sitio 9:**

- Extensión: 62,30 metros
- Manga máxima: 32,20 metros
- Desplazamiento máximo: 30.000 toneladas
- Longitud utilizable: 190 metros (considera boyas y duques de alba)

- Calado máximo: 10 metros
- Eslora máxima: 190 metros
- Carga: Granel liquido

Fuente: ver [10].

3. Problema

El repaso de la literatura local y el análisis del proceso de planificación en el terminal DP World, indican que el problema a abordar es la planificación óptima y resiliente de atraque en el puerto de San Antonio, con énfasis en la minimización de cambios en el plan inicial ante interrupciones. Este problema adquiere relevancia en un contexto donde el aumento en las toneladas de importaciones y exportaciones incrementa la presión sobre la logística portuaria, haciendo necesaria una asignación eficiente de los atraques.

La asignación de sitios de atraque en terminales como DP World implica un proceso complejo que involucra al Senior Vessel Planner y otros actores operativos, quienes utilizan diversas herramientas y consideran factores como las ventanas de trabajo, las características de los buques y las prioridades operacionales. El proceso busca optimizar tiempos y minimizar costos asociados, coordinando eficientemente las operaciones entre las partes involucradas.

4. Objetivos

El objetivo se centra en el desarrollo de un sistema optimizado para la replanificación de atraques portuarios que permita adaptarse a información dinámica, minimizando los cambios respecto al plan original, manteniendo la eficiencia operativa y priorizando la atención de las embarcaciones. A continuación, se presentan tanto el objetivo general de esta investigación como los objetivos específicos necesarios para su cumplimiento.

4.1. Objetivo General

Diseñar un sistema de replanificación para sitios de atraque portuarios que pueda actualizarse en tiempo real, integrando información sobre las condiciones actuales para reducir las alteraciones del plan inicial y, a su vez, maximizar la eficiencia operativa y priorizar la atención a los buques según corresponda.

4.2. Objetivos Específicos

- Desarrollar un modelo matemático de replanificación que se ajuste en función de nueva información sobre las operaciones portuarias, como tiempos de llegada y salida de los buques y las restricciones operativas del puerto.
- Configurar penalizaciones ajustables en el modelo, permitiendo a los usuarios definir elementos específicos en la replanificación, tales como: penalizaciones por cambios de sitio, retrasos en las salidas respecto al plan original, y situaciones en que un buque, a pesar de su puntualidad, no es atendido conforme al plan inicial.

- Evaluar el desempeño del modelo optimizado en términos de eficiencia operativa y disminución de congestión portuaria, asegurando que embarcaciones con mayor prioridad mantengan bajos niveles de espera.
- Configurar penalizaciones ajustables en el modelo, permitiendo a los usuarios definir elementos específicos en la replanificación, tales como: penalizaciones por cambios de sitio, retrasos en las salidas respecto al plan original, y situaciones en que un buque, a pesar de su puntualidad, no es atendido conforme al plan inicial.
- Diseñar e implementar una solución computacional basada en Python, utilizando el solver CPLEX y el wrapper DOcplex, que permita resolver instancias del modelo matemático de forma eficiente y flexible.
- Crear un módulo de software que permita cargar datos portuarios de entrada, como horarios de llegada, características de los buques y restricciones operativas, en un formato compatible con el modelo desarrollado.
- Evaluar el desempeño del modelo optimizado en términos de eficiencia operativa y disminución de congestión portuaria, asegurando que embarcaciones con mayor prioridad mantengan bajos niveles de espera.
- Validar la solución computacional a través de casos de prueba que representen escenarios reales o simulados, analizando los resultados para garantizar que el software cumpla con los objetivos planteados.

5. Estado del arte

La planificación naviera en terminales portuarias es un área crítica dentro de la gestión logística, especialmente en puertos de alto tráfico como el de San Antonio, uno de los más importantes en Chile. A medida que el volumen de operaciones crece y las embarcaciones aumentan su capacidad, se hace necesario optimizar la planificación del atraque de buques para mejorar la eficiencia de las operaciones portuarias [1].

El *problema de asignación de muelle* (*Berth Allocation Problem, BAP*) es un problema clásico de optimización en este contexto. Su objetivo principal es asignar los espacios de atraque disponibles de manera que se minimicen los tiempos de espera de los buques y se maximice la utilización de los recursos, como los muelles y las grúas. Sin embargo, uno de los mayores desafíos es gestionar las *incertidumbres operacionales*, como los retrasos en la llegada de los buques o la variabilidad en los tiempos de carga y descarga, lo que afecta significativamente los planes de atraque establecidos [?]. En contextos portuarios como el puerto de Ras Al Khaimah, los tiempos de llegada y manipulación de buques suelen desviarse de sus valores estimados, provocando disrupciones en los planes de atraque [6].

Para abordar estas incertidumbres, se han propuesto diversos enfoques de optimización que buscan no solo la eficiencia en el uso de los recursos portuarios, sino también la *resiliencia* y flexibilidad de la planificación. Entre estos enfoques, destaca la utilización de modelos matemáticos que incorporan la minimización de cambios respecto a un *plan inicial*, especialmente ante la ocurrencia de eventos disruptivos. Esto implica que el modelo de planificación debe considerar el *workplan* inicial y buscar soluciones que minimicen las alteraciones necesarias, manteniendo la eficiencia operativa [3]. Algunos estudios han desarrollado metodologías basadas en la recuperación en tiempo real, que

aplican modelos de re-optimización basados en la partición de conjuntos y algoritmos heurísticos inteligentes para reasignar naves en eventos de disrupción [6].

La *programación lineal entera mixta (MILP)* ha sido ampliamente utilizada para ajustar dinámicamente los planes de atraque ante eventos imprevistos. Sin embargo, modelos más avanzados, como el *Problema de Partición de Conjuntos Generalizado (GSPP)*, permiten una mayor flexibilidad al incorporar variables que representan cambios entre planes iniciales y replanificados [3]. Estos modelos son capaces de minimizar no solo el tiempo de servicio en puerto, sino también la cantidad de cambios necesarios en la planificación, lo cual es crucial para mantener la operatividad y reducir costos asociados a la reprogramación. De hecho, Umang et al. (2013) muestra que la implementación de modelos de replanificación basados en un horizonte de planificación rodante puede reducir significativamente los costos al reaccionar ante disrupciones de llegada y manipulación en tiempo real [6].

Además, se ha explorado el uso de restricciones y variables que consideran la precedencia y prioridad entre naves, permitiendo que los modelos reflejen de manera más precisa las necesidades y contratos existentes en el ámbito portuario [2]. También se han propuesto enfoques reactivos, como algoritmos heurísticos "greedy" que optimizan localmente la reasignación de muelles, los cuales pueden ser menos precisos pero ofrecen una solución computacionalmente eficiente en situaciones de congestión [6].

En el contexto del puerto de San Antonio, y específicamente en el terminal DP World, estos desafíos son especialmente relevantes debido al crecimiento constante del volumen de contenedores y la complejidad operativa.

6. Alternativas de Solución

Para abordar la problemática de replanificación de atraques en puertos bajo incertidumbre en tiempos de llegada y manipulación de las naves, se presentan diversas alternativas de solución que permiten gestionar eficazmente las interrupciones en los planes de atraque, manteniendo un equilibrio entre costos operacionales y adherencia al plan inicial.

6.1. Algoritmo Greedy Tradicional

El algoritmo greedy tradicional es una aproximación sencilla y directa para la reasignación de atraques en tiempo real. En este método, las naves se asignan al primer sitio de atraque disponible en el momento de su llegada, sin realizar movimientos adicionales de otras naves programadas. Este enfoque sigue una política de asignación basada en el orden de llegada, lo cual minimiza los tiempos de espera inmediatos, pero puede ser ineficaz en contextos de alta congestión, ya que no optimiza el uso del espacio portuario a largo plazo. Además, el algoritmo se implementa con baja complejidad computacional [6].

6.2. Algoritmo Greedy Inteligente

El algoritmo greedy inteligente busca mejorar el desempeño del algoritmo greedy tradicional evaluando de manera anticipada los costos de reasignación de cada nave en el momento de llegada. En este enfoque, cada vez que una nave arriba al puerto, el sistema evalúa todas las posibles posiciones de atraque para minimizar el costo total de reasignación de todas las naves aún no asignadas. Esto permite gestionar de forma más eficiente la reprogramación en condiciones de incertidumbre y congestión, logrando una mejor utilización del espacio portuario en comparación con el método greedy tradicional. Aunque el costo computacional es mayor, el algoritmo ofrece una adherencia superior al plan base y permite minimizar las interrupciones operativas [6].

6.3. Algoritmo de Optimización Basado en Recuperación

Este algoritmo de optimización se fundamenta en la reoptimización de las asignaciones de atraque de todas las naves no asignadas cada vez que se produce una interrupción en el plan base. La solución se basa en un modelo de partición de conjuntos, donde se generan todas las asignaciones factibles para las naves y se reoptimiza la asignación de acuerdo con un horizonte de planificación rodante. Este enfoque minimiza el desvío respecto al plan base, los tiempos de espera adicionales y los costos de reasignación espacial de las naves [6].

Entre las alternativas exploradas, el enfoque basado en la optimización con recuperación (6.3) destaca como la mejor solución debido a su capacidad para minimizar las interrupciones en tiempo real a través de la reoptimización de las asignaciones portuarias. Sin embargo, para abordar de manera integral los desafíos asociados a la variabilidad y estocasticidad en las operaciones portuarias, el método propuesto amplía este enfoque incorporando técnicas avanzadas de planificación rodante y modelos de partición de conjuntos, tal como se detalla en el siguiente apartado.

7. Método Propuesto

El método propuesto busca optimizar la planificación y recuperación en tiempo real de la asignación de atraques en el puerto de San Antonio, abordando la variabilidad e incertidumbre inherentes a las operaciones portuarias. Este enfoque se basa en el modelo desarrollado por Umang et al. (2013), que combina un esquema de planificación rodante en tiempo real con una programación base (baseline schedule) para minimizar la disrupción operativa causada por cambios en los tiempos de llegada y manipulación de las naves. La propuesta utiliza un modelo de partición de conjuntos generalizados (GSPP) que permite gestionar tanto la planificación inicial como las modificaciones necesarias frente a eventos disruptivos. Este enfoque asegura una asignación eficiente y flexible, manteniendo la continuidad operativa y reduciendo los costos asociados a los cambios en los planes de atraque. [6].

7.1. Conjuntos e Índices

- N : Conjunto de buques, indexado por i .
- M : Conjunto de muelles/sitios de atraque, indexado por k .
- $M_i \subseteq M$: Conjunto de muelles factibles para el buque i .
- $P = \{(i, j) \mid i, j \in N, i \neq j\}$: Conjunto de pares ordenados de buques.
- Para cada (i, k) , se puede tener un conjunto de *ventanas de bloqueo*, denotado por $\{(t_{init_\ell}, t_{end_\ell})\}$, donde ℓ indexa cada intervalo de bloqueo (por ejemplo, condiciones climáticas o bloqueos operativos).

7.2. Parámetros

- a_i : Tiempo de **llegada real** del buque i .
- A_i : Tiempo de **llegada planificada** del buque i en el cronograma base.
- e_i : Tiempo de **salida planificada** del buque i en el cronograma base.
- h_{ik} : Tiempo estimado de **manipulación** del buque i en el muelle k (duración real si asigna i a k).
- c_1, c_2, c_3 : Coeficientes de costo para cambios de muelle, retrasos en salida y retrasos adicionales, respectivamente.
- μ_i : **Prioridad** asignada al buque i .
- b_{ik} : Asignación **planificada** (0–1) del buque i al muelle k en el cronograma base.
- B : Constante grande utilizada en las restricciones de no superposición (Big- M).
- $ventanas_bloqueo_{i,k}$: Lista de intervalos $(t_{init_\ell}, t_{end_\ell})$ que representan *bloqueos* para el buque i si se asigna al muelle k .

7.3. Variables de Decisión

- $m'_i \geq 0$: Momento de **ataque actualizado** para el buque i .
- $e'_i \geq 0$: Momento de **salida actualizado** del buque i .
- $w'_i \geq 0$: Retraso adicional en tiempo de servicio para el buque i .
- $b'_{ik} \in \{0, 1\}$: Variable binaria que indica si el buque i se asigna finalmente al muelle k .
- $\delta_{e_i} \geq 0$: Mide la desviación en el tiempo de salida de i respecto al planificado e_i (valor absoluto).
- $d_{b_{ik}} \geq 0$: Mide el **cambio de sitio** para buque i (si $b_{ik} = 1$ y $b'_{ik} = 0$ o viceversa).
- $z_{ij} \in \{0, 1\}$: Orden temporal: $z_{ij} = 1$ si $e'_i \leq m'_j$ (el buque i termina antes de que empiece j).
- $s_{ij} \in \{0, 1\}$: Indica si los buques i y j **comparten el mismo muelle** (1) o no (0).
- $u_{i,k,\ell}, v_{i,k,\ell} \in \{0, 1\}$: Variables binarias auxiliares para modelar la disyunción de *ventanas de bloqueo*, donde ℓ indexa cada ventana $(t_{init_\ell}, t_{end_\ell})$ asociada al par (i, k) .

7.4. Función Objetivo

Definimos tres componentes:

$$Z_1 = \sum_{i \in N} (e'_i - a_i),$$

$$Z_2 = \sum_{i \in N} \left(c_1 \sum_{k \in M} d_{b_{ik}} + c_2 \mu_i \delta_{e_i} \right),$$

$$Z_3 = \sum_{i \in N} c_3 w'_i.$$

La **función objetivo** a minimizar es:

$$\text{mín} (Z_1 + Z_2 + Z_3).$$

7.5. Restricciones

1. **Restricción de llegada:**

$$m'_i \geq a_i, \quad \forall i \in N.$$

2. **Restricción de salida:**

$$e'_i = m'_i + \sum_{k \in M} (h_{ik} b'_{ik}), \quad \forall i \in N.$$

3. **Cálculo de w'_i (retraso adicional en servicio):**

$$\begin{aligned} w'_i &\geq (e'_i - a_i) - (e_i - A_i), \quad \forall i \in N, \\ w'_i &\geq 0, \quad \forall i \in N. \end{aligned}$$

4. **Definición de s_{ij} (comparten muelle):** Para cada par $(i, j) \in P$ y cada muelle $k \in M$,

$$s_{ij} \geq b'_{ik} + b'_{jk} - 1.$$

De esta manera, $s_{ij} = 1$ si hay al menos un k tal que $b'_{ik} = b'_{jk} = 1$.

5. **No superposición temporal:**

$$\begin{aligned} m'_j &\geq e'_i - B \left[(1 - z_{ij}) + (1 - s_{ij}) \right], \quad \forall (i, j) \in P, \\ m'_i &\geq e'_j - B \left[z_{ij} + (1 - s_{ij}) \right], \quad \forall (i, j) \in P. \end{aligned}$$

Estas restricciones garantizan que dos buques asignados al **mismo muelle** ($s_{ij} = 1$) no se traslapen en el tiempo, usando z_{ij} para indicar el orden.

6. **Factibilidad de muelle:**

$$\sum_{k \in M_i} b'_{ik} = 1, \quad \forall i \in N.$$

Cada buque i debe ser asignado a exactamente un muelle dentro de su conjunto factible M_i .

7. **Cálculo de la desviación de salida (δ_{e_i}):**

$$\begin{aligned} \delta_{e_i} &\geq e'_i - e_i, \quad \forall i \in N, \\ \delta_{e_i} &\geq e_i - e'_i, \quad \forall i \in N. \end{aligned}$$

8. **Cálculo del cambio de muelle ($d_{b_{ik}}$):**

$$\begin{aligned} d_{b_{ik}} &\geq b'_{ik} - b_{ik}, \quad \forall i \in N, \forall k \in M, \\ d_{b_{ik}} &\geq b_{ik} - b'_{ik}, \quad \forall i \in N, \forall k \in M. \end{aligned}$$

Esto linealiza la diferencia absoluta $|b'_{ik} - b_{ik}|$.

9. **Restricciones de ventanas de bloqueo:**

Sea $\text{ventanas_bloqueo}_{i,k} = \{(t_init_\ell, t_end_\ell)\}$ la lista de intervalos en que el **buque i no puede estar atracado** si usa el muelle k . Para cada intervalo ℓ , introducimos dos binarias $u_{i,k,\ell}$ y $v_{i,k,\ell}$:

$$\begin{aligned} e'_i &\leq t_init_\ell + \text{bigM} (1 - u_{i,k,\ell}), \\ m'_i &\geq t_end_\ell - \text{bigM} (1 - v_{i,k,\ell}), \\ u_{i,k,\ell} + v_{i,k,\ell} &\geq b'_{ik}, \\ u_{i,k,\ell} &\leq b'_{ik}, \quad v_{i,k,\ell} \leq b'_{ik}. \end{aligned}$$

Estas ecuaciones implementan la **disyunción**:

$$\text{si } b'_{ik} = 1 \implies (e'_i \leq t_init_\ell) \text{ OR } (m'_i \geq t_end_\ell).$$

Si el buque i no se asigna a muelle k , $b'_{ik} = 0$ y no se impone restricción efectiva sobre m'_i, e'_i para ese intervalo de bloqueo.

7.6. Supuestos

En el modelo, es necesario establecer ciertos supuestos en contextos específicos para representar casos particulares de manera consistente. Estos supuestos se evalúan de la misma forma a efectos prácticos y se detallan a continuación:

1. **Cierre de Puerto con un Barco Atracado:** Si una embarcación se encuentra atracado y el puerto cierra de forma planificada o no, existen dos opciones:
 - **Retiro de la Embarcación:** Si el barco decide retirarse con la mercancía restante, el tiempo de manipulación registrado en el modelo reflejará el tiempo que alcanzó a ser atendido antes del cierre. Este barco se considerará como una operación finalizada.
 - **Espera de la Embarcación:** Si el barco decide esperar para reanudar sus operaciones, se reingresará al modelo al momento de reapertura del puerto como una nueva operación, con el tiempo de manipulación restante. Este barco se considerará en espera, ubicado ya en el puerto.
2. **Asignación de Prioridades entre Embarcaciones:** Debido a la normativa portuaria, se asigna una prioridad a cada barco en función de su contexto y contenido. Para simplificar el modelo, esta prioridad se representa mediante un valor numérico asignado de forma arbitraria, siguiendo una lógica que respete la jerarquía de atención establecida en el puerto.

8. Resultados

Para llevar a cabo la re-planificación, se partirá de una planificación inicial obtenida mediante el modelo desarrollado por José Tomás Lorenzini, que replica condiciones reales de operación en el Puerto de San Antonio. Esta planificación será el punto de partida sobre el cual se aplicará un nuevo modelo matemático, diseñado para manejar simulaciones de restricciones operativas, como retrasos en la llegada de naves, variaciones en sus tiempos de manejo o el mismo cierre del puerto, estas restricciones reflejan disrupciones reales que pueden afectar la planificación portuaria, la solución será re-planificar la logística del puerto al nuevo óptimo, buscando minimizar los cambios hechos al plan inicial.

El modelo, utiliza técnicas de optimización y algoritmos de replanificación, evaluará la capacidad de adaptarse a estos cambios, midiendo el impacto en métricas clave como tiempos de espera y eficiencia en la asignación de recursos mediante distintos costos asociados a cada tipo de cambio. A través de estas simulaciones y del análisis de los resultados, se busca validar que el sistema pueda ajustarse de manera eficiente ante disrupciones, manteniendo la logística portuaria en un nivel óptimo a pesar de las variaciones en las condiciones operativas.

8.1. Instancia

En esta instancia del modelo de replanificación de atraques portuarios, se definen los conjuntos, parámetros y restricciones operativas específicas que representan la situación real del puerto. A continuación, se detallan estos elementos mediante listas para una mejor comprensión y visualización.

■ Conjuntos e Índices:

- $N = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$: **Conjunto de buques.**
- $M = \{1, 2, 3\}$: **Conjunto de sitios de atraque.**
- M_i : **Conjunto de sitios de atraque factibles** para cada buque $i \in N$.
 - $M_1 = \{1, 2, 3\}$
 - $M_2 = \{1, 2\}$
 - $M_3 = \{1, 2, 3\}$
 - $M_4 = \{1, 2, 3\}$
 - $M_5 = \{1, 3\}$
 - $M_6 = \{1, 2, 3\}$

■ Parámetros de Tiempo:

- a_i : **Tiempo de llegada real** del buque $i \in N$.

$$a_i = \{1 : 4, 2 : 3, 3 : 5, 4 : 5, 5 : 6, 6 : 11\}$$

- A_i : **Tiempo de llegada planificada** del buque $i \in N$.

$$A_i = \{1 : 4, 2 : 3, 3 : 1, 4 : 7, 5 : 9, 6 : 12\}$$

- e_i : **Tiempo de salida planificada** del buque $i \in N$.

$$e_i = \{1 : 7, 2 : 5, 3 : 5, 4 : 9, 5 : 10, 6 : 14\}$$

■ **Parámetros de Manipulación:**

- H_{ik} : **Tiempo mínimo de manipulación** del buque $i \in N$ en el sitio de atraque $k \in M$.

$$H_{ik} = \begin{Bmatrix} (1,1) : 6, & (1,2) : 4, \\ (1,3) : 3,0, & (2,1) : 1,4, \\ (2,2) : 2,5, & (2,3) : 4,0, \\ (3,1) : 3,3, & (3,2) : 1,1, \\ (3,3) : 3,0, & (4,1) : 4,0, \\ (4,2) : 2,0, & (4,3) : 3, \\ (5,1) : 3, & (5,2) : 3,0, \\ (5,3) : 2,0, & (6,1) : 3, \\ (6,2) : 4,0, & (6,3) : 2 \end{Bmatrix}$$

- h_{ik} : **Tiempo de manipulación estimado** del buque $i \in N$ en el sitio de atraque $k \in M$.

$$h_{ik} = \begin{Bmatrix} (1,1) : 6,5, & (1,2) : 4,5, \\ (1,3) : 3,0, & (2,1) : 2,2, \\ (2,2) : 2,5, & (2,3) : 4,0, \\ (3,1) : 3,3, & (3,2) : 1,1, \\ (3,3) : 3,0, & (4,1) : 4,0, \\ (4,2) : 2,0, & (4,3) : 3,5, \\ (5,1) : 3,1, & (5,2) : 3,0, \\ (5,3) : 2,0, & (6,1) : 3,2, \\ (6,2) : 4,0, & (6,3) : 2,9 \end{Bmatrix}$$

■ **Parámetros de Asignación y Ubicación:**

- b_{ik} : **Asignación planificada** del buque $i \in N$ al sitio de atraque $k \in M$ en el cronograma base.

$$b_{ik} = \begin{Bmatrix} (1,1) : 1, & (1,2) : 0, \\ (1,3) : 0, & (2,1) : 0, \\ (2,2) : 1, & (2,3) : 0, \\ (3,1) : 0, & (3,2) : 0, \\ (3,3) : 1, & (4,1) : 0, \\ (4,2) : 1, & (4,3) : 0, \\ (5,1) : 0, & (5,2) : 0, \\ (5,3) : 1, & (6,1) : 0, \\ (6,2) : 1, & (6,3) : 0 \end{Bmatrix}$$

- L_i : **Longitud** del buque $i \in N$ (en metros).

$$L_i = \{1 : 200, 2 : 100, 3 : 150, 4 : 100, 5 : 90, 6 : 300\}$$

- g_k : **Offset** inicial del sitio de atraque $k \in M$ (en metros).

$$g_k = \{1 : 0, 2 : 300, 3 : 600\}$$

■ **Parámetros de Costos y Prioridades:**

- $c_1 = 18, c_2 = 50, c_3 = 80$: **Coefficientes de costo**.
- μ_i : **Prioridad** asignada al buque $i \in N$.

$$\mu_i = \{1 : 100, 2 : 6, 3 : 2, 4 : 1, 5 : 9, 6 : 12\}$$

- $B = 10\,000$: **Constante grande** utilizada en las restricciones de no superposición.
- **Ventanas de Bloqueo**:
 - Las ****ventanas de bloqueo**** definen intervalos de tiempo durante los cuales un buque específico ****no puede**** atracar en un determinado sitio de atraque.
 - Solo se listan las combinaciones de buque y muelle que tienen ventanas de bloqueo activas.
 - Buque 1 en Muelle 1: (0, 23).
 - Buque 1 en Muelle 2: (0, 25).
 - Buque 1 en Muelle 3: (4, 7), (9, 11), (12, 20), (40, 50).
 - Buque 6 en Muelle 3: (10, 15).

8.2. Planificación inicial y replanificación

La planificación inicial está representada en el gráfico como un contorno rojo con línea punteada.

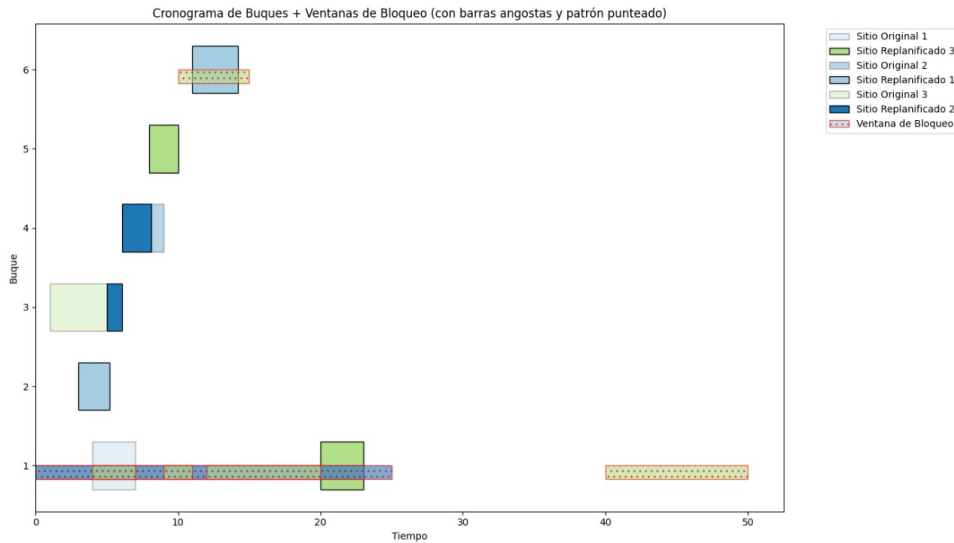


Figura 2: Gráfico de planificación inicial vs. replanificación.

Los factores considerados en esta planificación son los siguientes: el conjunto de buques, representado en el eje vertical, donde se enumeran las embarcaciones del 1 al 6. Los tiempos de inicio de la manipulación se ajustan en función de los tiempos de llegada planificados para cada buque. Además, se considera el tiempo mínimo necesario para la manipulación de cada embarcación y los valores de prioridad asignados a cada buque. Finalmente, se asigna una ventana de bloqueo representada como un rectángulo punteado. El color de fondo dentro de este rectángulo indica el sitio que se encuentra bloqueado en ese momento, mientras que en el eje Y se puede apreciar el buque afectado por el

bloqueo, cabe mencionar que los bloqueos se pueden superponer, es decir, pueden haber dos bloqueos en la misma ventana de tiempo para 2 o mas sitios distintos. Con estos datos, se genera una planificación inicial empleando el modelo de optimización propuesto por José Tomás Lorenzini, en donde se detallan los tiempos asignados a cada barco en representado como el eje horizontal.

A partir de este resultado, ante cualquier eventualidad o información adicional que pueda surgir durante la operación, es posible realizar una replanificación en busca de un plan óptimo que minimice los costos.

Asimismo, en la replanificación se tienen en cuenta los costos asociados a diversos ajustes potenciales en la planificación inicial, con el propósito de minimizar el impacto de las interrupciones. La figura 8.2 muestra claramente la dinámica entre las ventanas de bloqueo, la disponibilidad de los sitios y la programación de los buques. En dicha figura, el desplazamiento de las barras a lo largo del eje X representa la replanificación, donde las áreas transparentes corresponden al caso original y las áreas con mayor opacidad a la versión replanificada.

Gráficos de Información

En este escenario, se realiza una replanificación en función de las diferencias en los tiempos de llegada de las embarcaciones y cierres específicos de sitios para los buques. Algunas embarcaciones arriban antes de lo previsto, mientras que otras llegan con retraso, tal como fue mencionado en la instancia.

Con esta información y la figura 8.2, se puede analizar las razones detrás de los resultados obtenidos. En varios casos, los buques son reasignados a diferentes sitios para minimizar los tiempos de espera, priorizando la reducción de retrasos o la gestión de bloqueos previamente planificados.

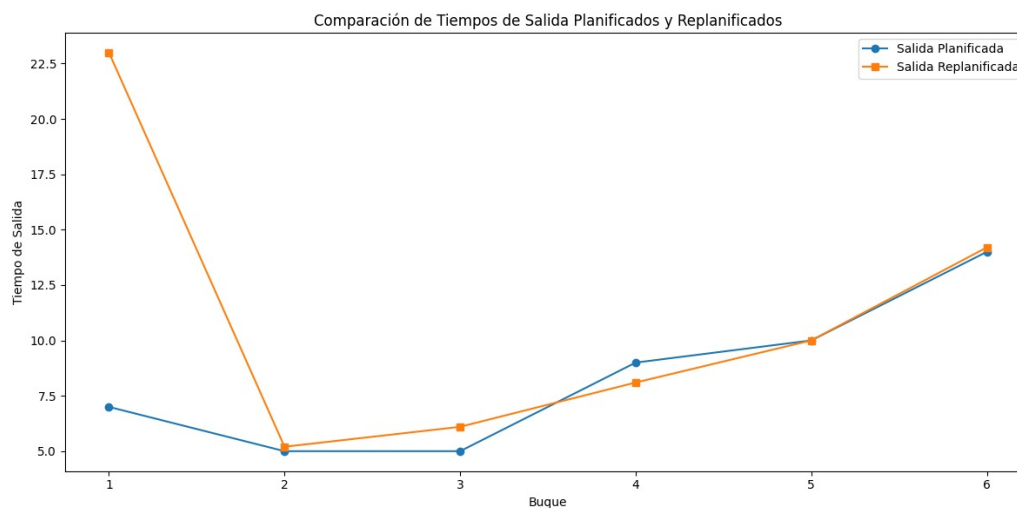


Figura 3: Gráfico de comparación de tiempos del plan inicial con la replanificación.

Se observa que, para la mayoría de los buques, el tiempo replanificado no difiere significativamente del tiempo planificado inicialmente. Sin embargo, en el caso del buque 1, esta diferencia es notable, lo cual se debe a la influencia de la ventana de bloqueo.

Es importante señalar que los resultados obtenidos están condicionados por las restricciones del modelo y la función objetivo, que busca minimizar los costos. Estos costos se reflejan en el siguiente gráfico.

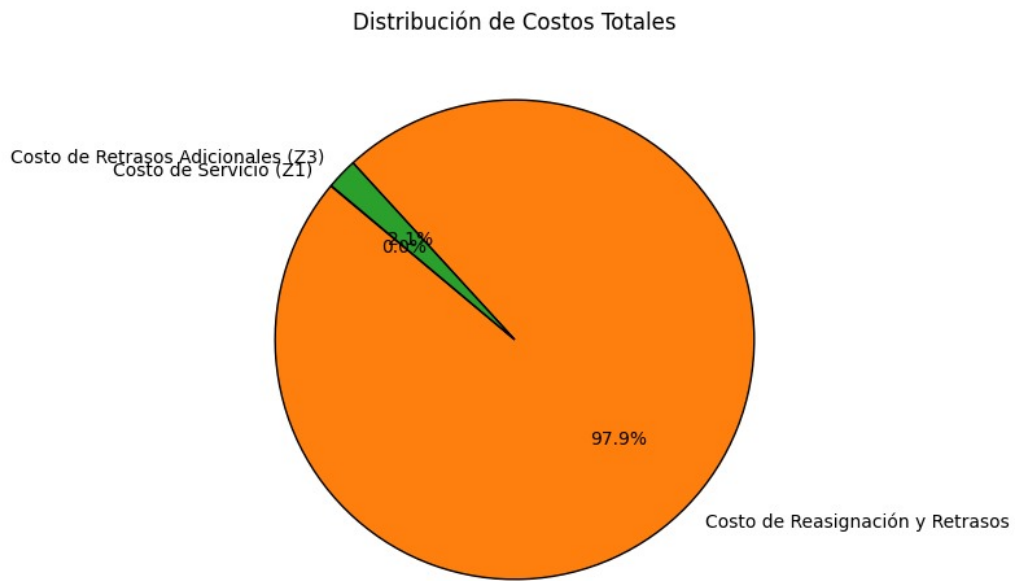


Figura 4: Gráfico de distribución de costos totales.

En la figura 4, se observa la proporción de cada tipo de costo. Al ser la suma total de costos significativos, el costo de reasignación y retraso fué el más alto, principalmente debido al retraso que sufrió el buque 1 debido a los bloqueos operativos que sufrió. Al no poder realizar sus operaciones hasta mucho tiempo después, el costo total por reasignación y retraso se elevó con respecto a las otras.

Proporción de Cambios de Sitio de Atrake

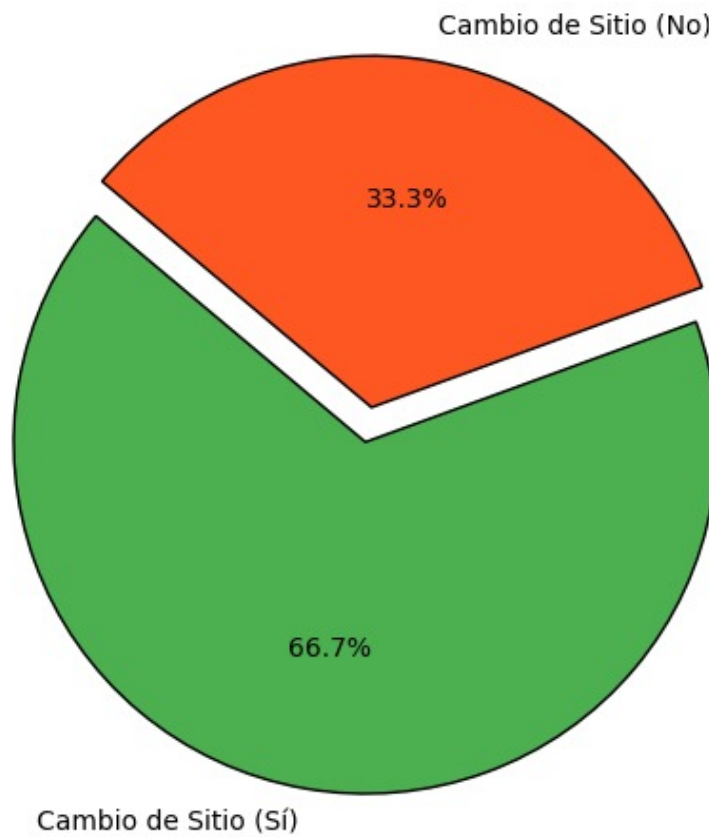


Figura 5: Gráfico de proporción de cambios de sitio.

Se puede apreciar que la mayoría de los barcos fueron reasignados, lo cual se debe a que el modelo priorizó invertir en cambios de sitio de los buques. Esta decisión se basó en que el costo asociado a la reasignación resultaba menos significativo en comparación con las pérdidas ocasionadas por retrasar otras operaciones.

Los retrasos tanto en llegada como en salida se ven reflejados en el siguiente gráfico.

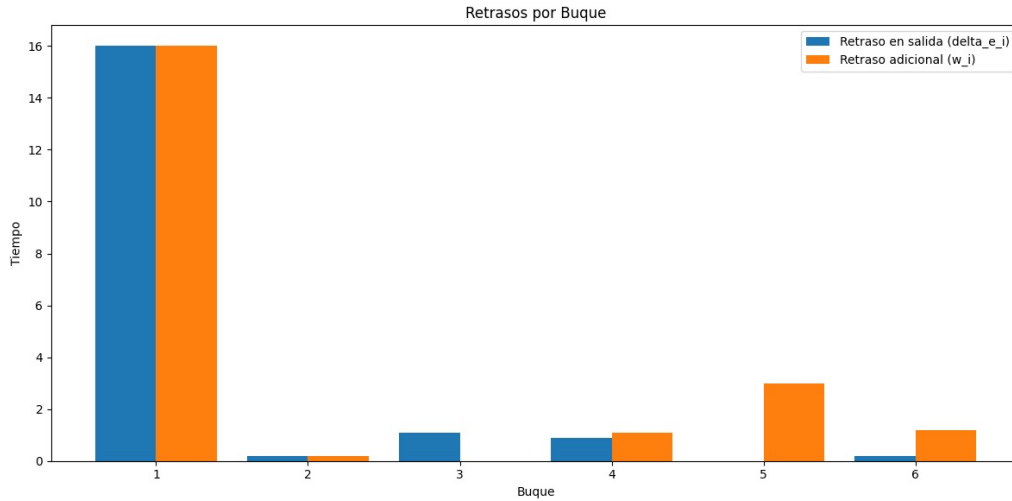


Figura 6: Gráfico de retraso por buque.

Como se mencionó anteriormente, no se observaron cambios significativos en los tiempos de operación de la mayoría de los buques, excepto en el caso del buque 1. Este presentó un retraso considerable con respecto a lo planificado inicialmente, debido a la influencia de la ventana de bloqueo.

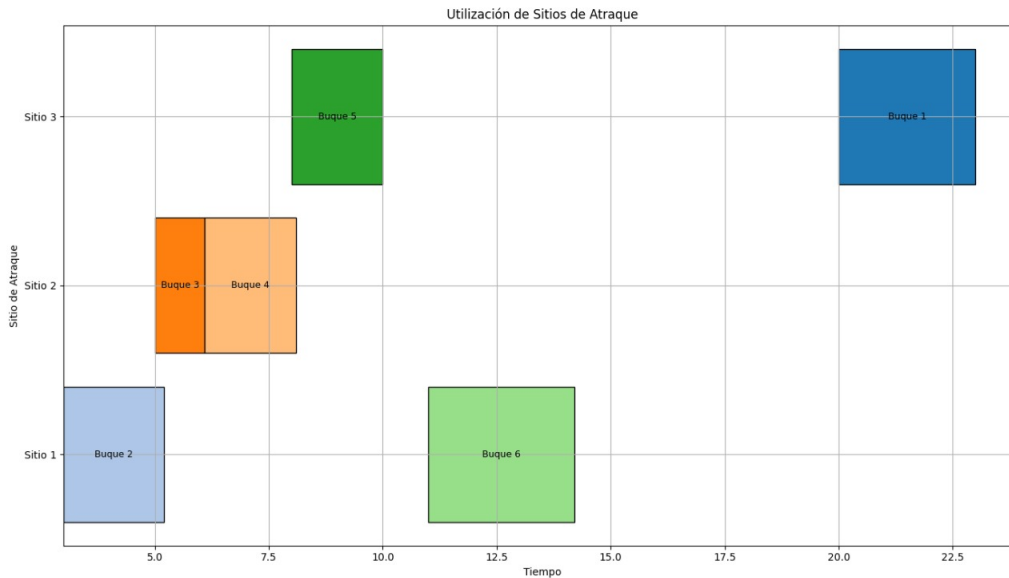


Figura 7: Gráfico de utilización de sitios.

La figura 7 representa el orden de atención de cada buque, esta vez visualizado como una línea de tiempo desde la perspectiva de los sitios. Este gráfico sirve como un resumen de la replanificación, mostrando el resultado final. Sin embargo, no proporciona información sobre el funcionamiento interno ni las decisiones tomadas por el modelo.

Referencias

- [1] Lorenzini, J. T. (2023). *Metodología para la planificación naviera en terminal DP World del Puerto de San Antonio*. Universidad de los Andes.
- [2] Martínez, P., y Valenzuela, R. (2022). *Modelo de Optimización para la Asignación de Sitios en Puertos*. Revista de Logística y Transporte.
- [3] Christensen, J., y Holst, A. (2008). *Generalized Set-Partitioning Problem*. European Journal of Operational Research.
- [4] Van der Steeg, J.-J., Oudshoorn, M., y Yorke-Smith, N. (2023). *Berth planning and real-time disruption recovery: a simulation study for a tidal port*. Flexible Services and Manufacturing Journal, 35, 70–110. <https://doi.org/10.1007/s10696-022-09473-8>.
- [5] Hendriks, M. P. M., Lefebvre, E., y Udding, J. T. (2012). *Simultaneous berth allocation and yard planning at tactical level*. OR Spectrum, 35, 441–456. <https://doi.org/10.1007/s00291-012-0305-4>.
- [6] Umang, N., Bierlaire, M., y Erera, A. (2013). *Real-time management of berth allocation with stochastic arrival and handling times*. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 54, 14–31.
- [7] Sistema de Visualización de Información Portuaria (SVIP), Directemar, Concesionaria STI. Disponible en: https://svip.directemar.cl/ui/busqueda_mapa?execution=e1s4. Accedido el 10 de noviembre de 2024.
- [8] Sistema de Visualización de Información Portuaria (SVIP), Directemar, Concesionaria DP World. Disponible en: https://svip.directemar.cl/ui/busqueda_mapa?execution=e1s3. Accedido el 10 de noviembre de 2024.
- [9] Sistema de Visualización de Información Portuaria (SVIP), Directemar, Concesionaria Panul. Disponible en: https://svip.directemar.cl/ui/busqueda_mapa?execution=e1s13. Accedido el 10 de noviembre de 2024.
- [10] Sistema de Visualización de Información Portuaria (SVIP), Directemar, Concesionaria Policarpo Toro. Disponible en: https://svip.directemar.cl/ui/busqueda_mapa?execution=e1s5. Accedido el 10 de noviembre de 2024.