

Replanificación del acceso de barcos al puerto de Sevilla a través de la ría del Guadalquivir

Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Autor: Ignacio Lovera Guerrero

Tutor: David Muñoz de la Peña Sequedo, Juan Moreno Nadales

Dpto. Ingeniería de Sistemas Automática
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2022



Replanificación del acceso de barcos al puerto de Sevilla a través de la ría
del Guadalquivir
Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Autor:

Ignacio Lovera Guerrero

Tutor:

David Muñoz de la Peña Sequeda, Juan Moreno Nadales
Catedrático de Universidad, Doctorando

Dpto. Ingeniería de Sistemas Automática
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2022

Replanificación del acceso de barcos al puerto de Sevilla a través de la ría del Guadalquivir:
Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Autor: Ignacio Lovera Guerrero
Tutor: David Muñoz de la Peña Sequedo, Juan Moreno Nadales

El tribunal nombrado para juzgar el trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes profesores:

Presidente:

Vocal/es:

Secretario:

acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

Fecha:

Agradecimientos

A mi familia, pareja y amigos, los cuales me han acompañado en este largo proceso de formación en la Escuela, siendo siempre fuente de apoyo en los momentos más cruciales y constituyendo lo que considero más importante y valioso en mi vida.

*Ignacio Lovera Guerrero
Sevilla, 2022*

"No vuelas como un ave de corral, cuando puedes subir como las águilas".

San Josemaría Escrivá de Balaguer

Resumen

En la actual sociedad globalizada en la que vivimos, el transporte marítimo juega un papel esencial en el desarrollo económico y social de un país o región. Por esta razón, durante los últimos años las autoridades de los países desarrollados han puesto todos sus esfuerzos en la mejora de los sistemas logísticos y cadenas de suministro, convirtiéndose estos últimos en un factor clave en el avance de una sociedad global cada vez más interconectada y dependiente del comercio internacional. Por este motivo, son numerosos los esfuerzos llevados en el ámbito académico, no sólo para la modernización de los actuales sistemas e infraestructura marítimas y portuarias mediante la implantación de nuevos paradigmas como la *industria 4.0* o el *internet de las cosas*, sino en el desarrollo de nuevas metodologías de control, planificación y gestión que no sólo mejoren la eficiencia de los sistemas logísticos actuales, sino que también contribuyan a reducir las emisiones contaminantes y con ello el impacto negativo del transporte sobre el medio ambiente.

Dentro de los diferentes escenarios de actuación en la mejora de los sistemas logísticos marítimos, uno de los problemas más estudiados durante los últimos años es la mejora del tránsito y control de embarcaciones en canales de acceso a puertos terrestres, es decir, vías artificiales o naturales que conectan mar abierto con diversos nodos logísticos de interior. La optimización de la gestión integral de la navegación de las distintas embarcaciones en su conjunto, así como las distintas restricciones operativas a las que este tipo de entornos suelen encontrarse sujetas, dan lugar a un complejo problema de planificación que, en la mayoría de los casos, es demasiado computacionalmente complejo para ser aplicado en tiempo real.

Especialmente compleja es la resolución del problema de planificación y control de embarcaciones en canales naturales donde, además de las distintas restricciones operativas, es necesario considerar aquellas impuestas por los distintos fenómenos naturales, como son la dinámica de las mareas oceánicas y el perfil batimétrico irregular de la ría. Para solventar este problema, en el presente trabajo proponemos el uso de una metodología de planificación y control que resuelve el problema de gestión de un conjunto de barcos en el canal del río Guadalquivir, una ría natural que conecta el océano Atlántico y el puerto de Sevilla. Comprobado el buen funcionamiento de la metodología propuesta, se lleva a cabo un estudio de cómo afectan al desempeño del sistema una serie de errores que pueden alterar el plan original planificado, como son los retardos en la hora de llegada a puerto o la disminución de velocidad por calentamiento de motor de las distintas embarcaciones. Analizadas las consecuencias de estos errores en términos del número de accidentes producidos y el empeoramiento de la función de coste, se propone en este trabajo un doble metodología de replanificación. En primer lugar, una replanificación fuera de línea donde las trayectorias de los distintos barcos se replanifican fuera de línea considerando los errores de retardo comunicados con antelación a la autoridad portuaria. En segundo lugar, se propone una arquitectura de control y una

metodología para la replanificación de las embarcaciones en tiempo real mediante la detección a través de la señal de GPS emitida por las embarcaciones de las distintas desviaciones que pueda producirse.

Abstract

In the current globalized society we live in today, maritime transport plays an essential role in the economic and social development of a country or region. For this reason, a great amount of efforts have been made during last years by international authorities to improve the efficiency of supply chains and the overall logistic process, been these key factors in the development of an increasingly interconnected society. Because of this, many are the research works that have emerged in the academy during last years whose aim is not only to modernize port facility through new paradigms such as the *industry 4.0* or the *internet of things*, but also to develop and implement new scheduling and control strategies to improve the efficiency of logistics systems while mitigating the environmental impact by reducing pollutant emissions.

Among the wide range of problems involved in the logistic process, one of the most studied problems during last years is the problem of scheduling vessels on inland waterways, i.e, those connecting to open sea to some inland port or logistic node. The optimal scheduling of a series of vessel sailing through an inland waterway, together with all operational constraints that must always be satisfied to ensure the safety and optimality of the overall operation give rise to a complex optimization problem that, in most cases, requires high computing times.

Specially complex is the problem of scheduling vessels in natural waterways where, apart from the different operational constraints, a series of natural phenomena, such as the effect of the sea tide and the irregular bathymetric profile, must be taken into account. To solve this problem, in this work we propose a mixed-integer optimization problem to solve the problem of scheduling vessels in natural waterways, taking as example the case of the Guadalquivir river that connects the Atlantic ocean and the port of Seville, in the south of Spain. After checking the good performance of the proposed scheduling algorithm, a study is carried out to analyse how different unexpected events, such as arrival delays or a reduction in the speed of the vessels due to engine warm-ups affect the development of the scheduled plan. After showing the bad consequences these events have on the performance and safety of the operation, a double re-scheduling strategy is proposed in this work to obtain new plan that mitigates or eradicates the negative effects of these events. First, an offline re-scheduling is proposed whereby vessels are re-scheduled before they arrive to the waterway. Then, a novel real-time re-scheduling architecture and a modification of the previously proposed scheduling problem are developed to account for any unexpected event that may happen while vessels are already sailing through the waterway. To do that, the real-time GPS signal emitted by each vessel is employed to compare the current position of all vessels to the expected position according to the plan.

Índice Abreviado

<i>Resumen</i>	III
<i>Abstract</i>	V
<i>Índice Abreviado</i>	VII
1 Objetivo del proyecto	1
2 Casuística y características del puerto de Sevilla	3
2.1 Ubicación geográfica	3
2.2 Esclusa	3
2.3 Terminales	4
2.4 Intermodalidad	6
2.5 Empresas asociadas	9
2.6 Restricciones de entrada	10
2.7 Tráfico marítimo	10
3 Descripción de la ría del Guadalquivir	13
3.1 Introducción	13
3.2 Fundamentos hidrodinámicos	13
3.3 Batimetría	14
3.4 Influencia de la marea	14
3.5 Entorno biológico	15
4 Problema a resolver	17
4.1 Estado del arte	17
4.2 Base teórica del proyecto	25
5 Experimentos y resultados	33
5.1 Parámetros	33
5.2 Generación del escenario	34
5.3 Necesidad de replanificación	36
5.4 Replanificación convencional	41
5.5 Replanificación completa fuera de línea	43
5.6 Replanificación en tiempo real	44
5.7 Conclusiones	46

<i>Índice de Figuras</i>	47
<i>Índice de Tablas</i>	49
<i>Bibliografía</i>	51
<i>Glosario</i>	53

Índice

<i>Resumen</i>	III
<i>Abstract</i>	V
<i>Índice Abreviado</i>	VII
1 Objetivo del proyecto	1
2 Casuística y características del puerto de Sevilla	3
2.1 Ubicación geográfica	3
2.2 Esclusa	3
2.3 Terminales	4
2.3.1 Clasificación	4
2.3.2 Distribución	5
2.4 Intermodalidad	6
2.4.1 Introducción	6
2.4.2 Marco legal	6
2.4.3 Descripción de las vías	6
2.4.4 Flujo de información	8
2.5 Empresas asociadas	9
2.6 Restricciones de entrada	10
2.7 Tráfico marítimo	10
3 Descripción de la ría del Guadalquivir	13
3.1 Introducción	13
3.2 Fundamentos hidrodinámicos	13
3.3 Batimetría	14
3.4 Influencia de la marea	14
3.5 Entorno biológico	15
3.5.1 Efectos antropogénicos	15
3.5.2 Distribución de la sedimentación	16
4 Problema a resolver	17
4.1 Estado del arte	17
4.1.1 Problema de programación difusa de buques en vías navegables de un solo sentido	18
4.1.2 El problema de la planificación del tráfico marítimo interior	19
4.1.3 Planificación de la navegación en rías con restricciones de marea	21
4.2 Base teórica del proyecto	25

4.2.1	Función de coste	25
4.2.2	Restricciones de velocidad	25
4.2.3	Restricciones de cruce	26
4.2.4	Restricciones de adelantamiento	27
4.2.5	Restricciones de profundidad	28
4.2.6	Cálculo de los tubos de seguridad	28
4.2.7	Parámetros del modelo	29
4.2.8	Planificación por nodos	30
	Gestión de islas de marea	30
5	Experimentos y resultados	33
5.1	Parámetros	33
5.2	Generación del escenario	34
5.3	Necesidad de replanificación	36
5.3.1	Fundamentos	36
5.3.2	Influencia de las variables	38
	Lambda	38
	Probabilidad de retraso	39
	Probabilidad de calentamiento	40
5.4	Replanificación convencional	41
5.4.1	Introducción	41
5.4.2	Análisis de factibilidad	41
5.4.3	Relación entre los tiempos de salida y el coste	42
5.5	Replanificación completa fuera de línea	43
5.6	Replanificación en tiempo real	44
5.7	Conclusiones	46
	<i>Índice de Figuras</i>	47
	<i>Índice de Tablas</i>	49
	<i>Bibliografía</i>	51
	<i>Glosario</i>	53

1 Objetivo del proyecto

Los objetivos principales del presente proyecto son:

1. Estudio y análisis de la casuística actual del Puerto de Sevilla y su ría de acceso, el Canal del Guadalquivir.
2. Análisis de la marea y el perfil batimétrico irregular del canal.
3. Desarrollo de algoritmo de planificación global de embarcaciones en el canal del Guadalquivir para mejorar la eficiencia de la operativa y garantizar la seguridad.
4. Estudio de los diferentes eventos inesperados que afectan la planificación en el canal y su impacto en la actuación y producción de accidentes.
5. Propuesta de algoritmo de replanificación fuera de línea para la corrección de las trayectorias en caso de retardo por parte de alguna o varias de las embarcaciones.
6. Estudio de cómo el número de barcos con retardo en la replanificación y el tiempo de retardo afectan a la factibilidad y optimalidad del problema de replanificación.
7. Arquitectura de detección de incidentes y replanificación en tiempo real.
8. Análisis de la mejora de la seguridad mediante la aplicación del algoritmo de replanificación.

2 Casuística y características del puerto de Sevilla

En este primer capítulo del proyecto nos centraremos en describir las características más generales del puerto de Sevilla, con el objetivo de establecer el contexto hacia en el cual se enclava el presente trabajo y ver así cuáles son las características tanto del puerto como de la ría que condicionan la navegación en el Canal del Guadalquivir. Toda la información y datos mostrados en este capítulo se pueden ser obtenidos y consultados de manera pública, principalmente a través de la página web del puerto de Sevilla [1].

2.1 Ubicación geográfica

El puerto fluvial de Sevilla se encuentra localizado al suroeste de la ciudad de Sevilla, en el sur de España. Este está conectado con el Océano Atlántico a través del cauce natural del río Guadalquivir, el cual recorre 90 kilómetros desde el propio puerto hasta su desembocadura, en la localidad costera de Sanlúcar de Barrameda. Es en el estuario del río donde las embarcaciones que pretenden acceder al puerto permanecen a la espera de recibir el permiso de acceso al canal en aras de una operación segura.

Esta ruta de tránsito marítimo interior está incluida en la Red Transeuropea de Transporte marítimo, recibiendo el nombre de Eurovía del Guadalquivir, con referencia E 60.02. En la figura 2.1 se muestra una imagen vía satélite del canal del Guadalquivir a lo largo de todo su recorrido.

2.2 Esclusa

Debido al desnivel del canal en su entrada a la ciudad de Sevilla, el acceso a puerto de todas y cada una de las embarcaciones se realiza a través de una esclusa de agua que permite la elevación de las embarcaciones para salvar la irregularidad del terreno. Su funcionamiento se basa en el llenado y vaciado de una cámara donde las distintas embarcaciones se alojan. Dicha esclusa se encuentra localizada junto a la dársena del Guadalquivir, a 87 kilómetros aguas arriba de la desembocadura del río y recibe el nombre de Puerta del Mar.

Un aspecto interesante a comentar es la influencia antrópica que tienen este tipo de construcciones en el cauce fluvial del río, experimentando éste una importante modificación de su nivel, causa de la obra de su instalación, similar al producido por otro tipo de estructuras como, por ejemplo, los distintos diques de abastecimiento de los diferentes arrozales localizados junto a la ribera del río a lo largo de su recorrido, o el embalse de la localidad de Alcalá del Río allende la ciudad de Sevilla. A continuación se listan las diferentes dimensiones de la esclusa.

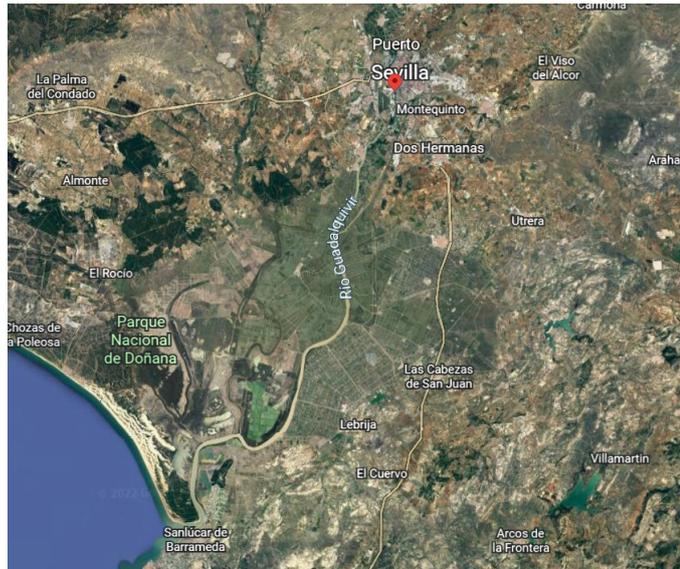


Figura 2.1 Imágen vía Satélite de la ría del Guadalquivir.



Figura 2.2 Esclusa Puerta del Mar.

- **Anchura:** 39 m
- **Calado:** 11 m
- **Longitud:** 280 m

2.3 Terminales

2.3.1 Clasificación

Las principales mercancías que recibe el puerto de Sevilla son: chatarra, cementos, productos siderúrgicos, abonos, cereales y distintos tipos de contenedores con productos de distinta índole. Estas mercancías son recibidas en distintas terminales, cada una de las cuales recibe de manera clasificada una determinada tipología de producto. Una terminal se encuentra constituida por una serie de instalaciones portuarias que sirve de interfaz entre el modo de transporte marítimo y los demás modos de transporte. Cada terminal tiende a especializarse en un determinado tipo de mercancía. Las distintas terminales de los que consta el puerto de Sevilla se listan en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Terminales principales.

Terminal	Especialidad
Dársena del Cuarto	Graneles sólidos, líquidos y mercancía general.
Aldeport	Graneles sólidos y mercancía general.
Portuaria Sevitrade Esclusa	Graneles líquidos, sólidos y mercancías general convencional.
Carbón Puerto Operaciones Portuarias	Graneles líquidos, sólidos y mercancía general convencional.
Logística de Líquidos Sevitrade	Graneles líquidos y multi-producto.
Ferroviaria	Contenedores.
Marítima del Guadalquivir	Contenedores y ro-ro.

2.3.2 Distribución

En este subapartado se muestra, de manera gráfica, cómo están distribuidas a lo largo del puerto cada una de las diferentes terminales mencionadas en el subapartado anterior, siguiendo una ruta ascendente desde la esclusa Puerta del Mar. Las imágenes mostradas en las Figuras 2.3 y 2.4 han sido tomadas mediante la aplicación de Google Earth.

**Figura 2.3** Sección 1.**Figura 2.4** Sección 2.

2.4 Intermodalidad

2.4.1 Introducción

Uno de los principales aspectos que hace más atractivo el puerto de Sevilla es su carácter intermodal, es decir, la interconexión de diferentes tipos de medios de transporte para la distribución de los distintos productos. El hecho de que el puerto cuente con acceso directo a vías ferroviarias resulta muy atractivo para diversos clientes para los cuales el transporte ferroviario supone una gran ventaja en términos de rentabilidad y rapidez.

2.4.2 Marco legal

La ley 38/2015 del Sector Ferroviario (en adelante LSF), señala que las infraestructuras ferroviarias de titularidad de una Autoridad Portuaria en los puertos de interés general y que estén conectadas a la Red Ferroviaria de Interés General (RFIG), formarán parte de ésta, ejerciendo la Autoridad Portuaria determinadas funciones que la Ley atribuye a los administradores de infraestructuras. Igualmente, diferentes artículos de dicha Ley, como el 42 o el 46, señalan que las obligaciones establecidas en la LSF resultan también de aplicación a los explotadores de las instalaciones de servicio situadas en terrenos portuarios.

El Reglamento de Ejecución (UE) 2017/2177, de 22 de noviembre, relativo a las instalaciones de servicio y a los servicios ferroviarios conexos (REISSFC), establece normas detalladas sobre el procedimiento y los criterios que deben seguirse para el acceso a las instalaciones de servicio y a los servicios prestados en ellas. Asimismo, requiere de los explotadores de instalaciones de servicio, que elaboren una descripción de sus instalaciones y de los servicios de los cuales sean responsables.

Esto nos permite que tengamos acceso de una forma plenamente transparente a los datos más relevantes acerca de estas vías, así como de dónde se encuentran situadas, cómo se ven involucradas las empresas en este tipo de conexiones, qué conexión tienen con las terminales, cuál es la capacidad de estas vías, etc ...

La red ferroviaria del puerto de Sevilla se establece a partir de la conexión física de la infraestructura ferroviaria del Puerto de Sevilla con la RFIG administrada por Adif. Esta permite el paso de los trenes que entran o salen del puerto de Sevilla.

2.4.3 Descripción de las vías

La vía de circulación general es la vía nº 1, que conecta todo el perímetro del Puerto formando un anillo ferroviario que permite el acceso de trenes entre ambos márgenes por la zona norte y sur del Puerto de Sevilla. Sin entrar en un detalle sobre la distribución de estas vías, se listan a continuación las instalaciones que abarca este tipo de transporte citando algunas de sus características fundamentales.

Tabla 2.2 Primera instalación.

Instalaciones de servicios N° 1	
Titular	Carbón Puerto Operaciones Portuarias S.A.
Nombre y ubicación	Terminal Carbón Puerto
Características de instalación	La longitud máxima del tren sin partir debe ser menor de 300 mts. 1 vía única de carga/descarga y recepción/expedición
Ocupación Privativa	La instalación esta otorgada en concesión por un plazo de 25 años, hasta diciembre de 2043.
Servicios Ferroviarios	Carga/descarga de productos siderúrgicos.

Tabla 2.3 Segunda instalación.

Instalaciones de servicios N° 2	
Titular	Autoridad Portuaria de Sevilla.
Nombre y ubicación	Playa de vías muelle de Tablada
Características de instalación	La longitud máxima útil del tren sin partir deber ser menor de 250 mts. Una única vía de carga/descarga.
Ocupación Privativa	Ni concesionada ni se explota en régimen de autorización
Servicios Ferroviarios	Carga/descarga de productos siderúrgicos.

Tabla 2.4 Tercera instalación.

Instalaciones de servicios N° 3	
Titular	Terminal Marítima del Guadalquivir S.L.
Nombre y ubicación	Terminal Marítima del Guadalquivir. Puerto Oeste: Muelle del Centenario
Características de instalación	Longitud máxima útil del tren sin partir de 750 mts Terminal contenedores T.M.G.: <ul style="list-style-type: none"> • 1 vía de expedición/recepción • 2 vías de carga/descarga Cantil muelle 400 mts: <ul style="list-style-type: none"> • 2 vías de carga/descarga
Ocupación Privativa	La instalación está otorgada en concesión por un plazo de 30 años.
Servicios Ferroviarios	Carga/descarga de contenedores. Suministro de combustible mediante cisternas móviles

Tabla 2.5 Cuarta instalación.

Instalaciones de servicios N° 4	
Titular	Autoridad Portuaria de Sevilla.
Nombre y ubicación	Puerto Oeste: muelle del Centenario, vías cantil del muelle.
Características de instalación	Longitud máxima útil del tren sin partir debe ser menor de 750 mts <ul style="list-style-type: none"> • 1 vía única de carga/descarga. • 1 vía de recepción/expedición.
Ocupación Privativa	Ni concesionada ni se explota en régimen de autorización
Servicios Ferroviarios	Descarga de transportes especiales (transformadores ABB).

Además de comentar estas instalaciones, algunos datos interesantes sobre la composición de la vía son:

- Las vías no se encuentran electrificadas.
- En las plataformas de muelles, terminal ferroviaria y playa de vías en el muelle de Tablada, así como en las intersecciones especiales, las vías tienen los carriles embebidos en hormigón.
- La red ferroviaria gestionada por la APS está compuesta de vías de mercancías. Estas cuentan con un ancho ibérico de 1688 mm.

2.4.4 Flujo de información

Son cuatro las entidades que entran en juego a la hora de relizar una correcta coordinación del flujo de permisos e información para que el transporte intermodal ferroviario se pueda realizar dentro de los márgenes legales a su vez que garantizando la productividad del puerto.

Estas entidades son las siguientes:

- **ADIF:** administrador de infraestructuras ferroviarias. Es una entidad pública empresarial adscrita al Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. Es la propietaria de las infraestructuras y encargada de su gestión, que proporciona sus servicios a cualquier operador ferroviario que los solicite.
- **Empresas Ferroviarias:** empresas que pueden solicitar capacidad de infraestructura e intermediar en el mercado del transporte por ferrocarril.
- **Puerto de Sevilla:** es el órgano administrativo fundamental para establecer las interconexiones de las necesidades de las distintas partes interesadas de ejercer algún tipo de tránsito de mercancías en sus infraestructuras. Puesto que el transporte es intermodal, debe de haber un consenso entre el puerto y la empresa pública ADIF, ya que entran en juego el uso de instalaciones de dos entidades distintas.
- **Terminal Ferro-Portuaria:** son las terminales las cuales se encargan de la gestión de la mercancía contenerizada destinada a ser transportada en los trenes. Ejerce de corredor ferroviario con el puerto.

La coordinación diaria del tráfico ferroportuario es llevada a cabo mediante una comunicación continua entre el puerto de Sevilla y ADIF, las cuales ponen a su disposición las infraestructuras necesarias para que se realice un transporte intermodal, de manera que haya una coordinación a la hora de la descarga de contenedores de los barcos para mas tarde, ser cargados en trenes los cuales hacen uso de las vías administradas por ADIF.

Con respecto a la accesibilidad de los trenes a las vias que llevan a la conexión con el puerto, las empresas ferroviarias deben de realizar una petición de acceso a ADIF, para el uso de instalaciones, y en el caso de que sea así, ver las ventanas de tiempo de las que dispone para que puedan realizar su entrada.

Del mismo modo estas empresas ferroviarias deben de realizar una planificación con el puerto de Sevilla, para ver cuales son las necesidades de carga/descarga que demanda, así como la elaboración de una planificación semanal para llevar a cabo una correcta operación de conexión.

Por último, las terminales ferro-portuarias deben de realizar una planificación de operaciones con el puerto de Sevilla, para saber con que horarios deben de cumplir, para así poder llevar a los trenes la mercancía en el tiempo acordado, ya que si esto no se produce, generaría grandes problemas de planificación, tráfico y gestión del tiempo.

La relaciones que guardan las siguientes entidades en el flujo de información y permisos se muestran en la siguiente figura:



Figura 2.5 Flujo Información Ferroportuaria.

2.5 Empresas asociadas

Para la correcta gestión y funcionamiento del puerto existen una serie de empresas asociadas que tratan distintos puntos indispensables en las distintas áreas de gestión.

Podemos recalcar fundamentalmente las tres siguientes:

- **Serviport:** es la empresa encargada de la gestión general del puerto. Se especializa fundamentalmente en el desarrollo e implantación de las nuevas tecnologías para una correcta productividad del puerto, encargándose de aspectos como telecomunicaciones, informática, logística, formación e ingeniería, comercialización, gestión, explotación, mantenimiento y gestión de operaciones.

- **APS:** autoridad Portuaria de Sevilla. Es el organismo público responsable de la gestión del Puerto de titularidad estatal de Sevilla y de la Eurovía Guadalquivir (E-60.02), en sus 90 kilómetros hasta la desembocadura del Guadalquivir en el océano Atlántico. Depende del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. Se puede decir que es el pilar legislativo del puerto, atendiendo la supervisión del mismo dentro de los marcos legales.
- **Prácticos de Huelva:** empresa focalizada en otorgar trabajadores que aseguren un tránsito marítimo seguro. Estos trabajadores son especialistas en el pilotaje y la navegación de la ría del Guadalquivir, asegurando un transporte seguro y comprometido con las medidas del puerto. Un aspecto importante a recalcar es el hecho de que no se puede navegar por la ría si el barco no está dirigido por un práctico, lo cual recalca el papel fundamental que juega esta empresa para un correcto funcionamiento del puerto.

2.6 Restricciones de entrada

Como se verá más adelante, uno de los principales condicionantes de la navegación en la ría del Guadalquivir son las dimensiones de las embarcaciones. Éstas condicionan no sólo los trayectos de cada una de las embarcaciones, sino las distintas interacciones entre las embarcaciones, como son las maniobras de adelantamiento o cruce. En términos generales las restricciones que indica el puerto son las siguientes:

- **Eslora máxima:** 190 *m*.
- **Manga máxima:** 30 *m*.
- **DWT máximo:** 40.000 *tm*.
- **Calado aéreo máximo:** 42 *m*.
- **Calado:** 7.5 *m*

Dónde la eslora hace referencia al largo de la embarcación, la manga a su anchura máxima, y el calado aéreo a su altura. El calado como término general hace referencia a la porción de altura del barco sumergida bajo la superficie del agua, y que en condiciones estándares dependerá del peso de la embarcación, razón por la cual este parámetro puede verse variado a la entrada y salida del puerto, en función de las mercancías que la embarcación transporte. Por otro lado, DWT (Deadweight tonnage) mide el límite de carga máximo que cada embarcación puede transportar.

2.7 Tráfico marítimo

A la hora de describir el puerto, es indispensable hablar de la cantidad de mercancías que pasan por el mismo, así como del tráfico marítimo que acoge. El puerto de Sevilla recibe una numerosa variedad de mercancías de distinta tipología tanto como por su tamaño como por su estado de agregación física. Para simplificar esta variedad, vamos a clasificar los productos en 5 grupos: pasajeros, ro-ro, líquidos, contenedores y granel. Ro-ro, acrónimo del término en inglés Roll On-Roll off, hace referencia a cualquier tipo de embarcación que transporte cargamento rodado, ya sean automóviles, camiones o vehículos industriales, entre otros. Este sistema de transporte marítimo se beneficia de rampas, tanto presentes en el barco como fijas en tierra, para hacer práctica y segura la carga y descarga de los vehículos transportados.

Por otra lado, se denomina mercancía de tipo granel al conjunto de bienes o materiales que se transportan sin empaquetar, ni embalar, en grandes cantidades. Esta carga se divide principalmente en carga a granel sólida o seca y carga a granel líquida.

Basandonos en los datos estadísticos publicados por la pagina oficial del puerto, podemos hacer un análisis del trafico basado en la cantidad de productos que llegan a puerto mensualmente. Es importante recalcar que estos productos son de distinta índole y que por tanto el volumen transportado es muy distinto dependiendo del tipo de mercancía.

A continuación pasamos a mostrar en este gráfico un esbozo general de la variación del tráfico de productos del puerto en el último año.

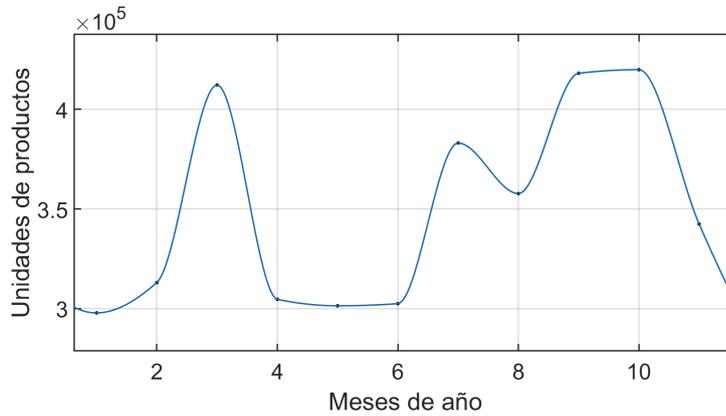


Figura 2.6 Tráfico marítimo anual en términos de productos.

Los meses de año corresponden desde mes de Marzo de 2021 a Febrero de 2022. Esto es debido a que en el momento de la elaboración de esta gráfica eran los datos anuales más recientes de los que disponíamos para hacer el estudio.

3 Descripción de la ría del Guadalquivir

Una vez presentada de manera genérica la casuística del puerto de Sevilla, abordamos ahora una descripción detallada de la ría del Guadalquivir, enfocándonos en cuáles son sus principales características y cómo afectan éstas al tráfico marítimo en la ría. Son muy diversos los parámetros que hay que tener en cuenta para asegurar un transporte seguro y productivo. Para ello se han realizado numerosos estudios para predecir el comportamiento y las fluctuaciones del río, tanto en su composición biológica como las fluctuaciones de nivel y caudal que éste experimenta.

A continuación se describen de manera detallada cada uno de estos parámetros, la relación que estos guardan entre sí, y la manera en que éstos afectan al objeto de estudio de este proyecto.

3.1 Introducción

El río Guadalquivir cuenta con una longitud de 656 kilómetros, desde su nacimiento en la Sierra de Cazorla (Jaén) hasta la localidad de Sanlúcar de Barrameda, donde desemboca en el océano Atlántico. A lo largo de su curso bajo, desde la localidad de Palma del Río a la desembocadura, el río presenta una pendiente muy suave, y en el último tramo, en la zona de la desembocadura, conforma un amplio estuario en el que se ubica el Parque Nacional de Doñana, con anchuras de hasta más de 4 kilómetros en la parte distal y de 500 metros en la parte interior.

Haciendo referencia a términos de carácter geológico, es interesante comentar que la depresión del río pertenece a la Cuenca del Guadalquivir, que es considerada una cuenca de antepaís situada al Este de la Cordillera Bética. Una cuenca antepaís se puede definir como aquella en la que se depositan sedimentos procedentes de la propia Cordillera Bética, la cual se define como orógena, es decir, que es de estructura lineal, y se sitúa entre dos placas ya sean continentales u oceánica.[3]

3.2 Fundamentos hidrodinámicos

El régimen hídrico del río Guadalquivir se caracteriza por su carácter estacional, con crecidas en otoño e invierno y estiajes muy marcados. El caudal fluvial máximo en crecida es de $5.000 \text{ m}^3/\text{s}$, y de $183 \text{ m}^3/\text{s}$ en estiaje. No obstante, se alcanzarían caudales superiores, de no ser por el control que, aguas arriba, ejercen los embalses situados en la cuenca del Guadalquivir. El término estiaje hace referencia al caudal mínimo del río marcado por una época del año determinada. Las mareas son de tipo semidiurno y de rango mesomareal, atenuándose la onda de marea por efecto de la resonancia provocada por la esclusa del puerto de Sevilla. La máxima velocidad del flujo se alcanza en condiciones de marea viva coincidente con crecidas fluviales, pudiendo alcanzarse

hasta 3.21 m/s . En situación de caudales fluviales normales o estiaje, la velocidad de flujo es de $1,54 \text{ m/s}$, con mínimas en situación de marea muerta. El viento también ejerce una importante acción hidrodinámica. En situación de vientos del Sur y Suroeste, generalmente causantes de precipitaciones en la zona, el río incrementa su caudal. El viento ejerce también una acción directa sobre la superficie del agua, provocando oleaje y corrientes que pueden contraponerse o incrementar la fuerza de la corriente mareal.

La temperatura del agua se mantiene entre 10°C y 28°C , y no presenta estratificación vertical. No obstante, debido a la proximidad del mar, existe un gradiente salino horizontal desde la desembocadura hasta la conexión sur con la Corta de los Jerónimos, zona a partir de la cual el agua es dulce [3].

3.3 Batimetría

La batimetría se define como el estudio de las irregularidades de profundidad de un cauce o superficie acuática natural. De cara a la planificación que este proyecto conlleva, es de vital importancia el estudio de la batimetría del río Guadalquivir, puesto que ésta delimita el calado máximo de las embarcaciones que pueden navegar por el río.

Una primera solución que a primera vista parece muy lógica, es un dragado del fondo del río, de manera que dote de una mayor profundidad al mismo para que puedan pasar embarcaciones con un calado mayor, y que en cierta parte el tráfico marítimo no se vea tan condicionado por la estacionalidad de la marea. Sin embargo, debido a la importancia medioambiental de la zona donde la ría se enclava, el Parque Nacional de Doñana, el dragado del río no está permitido debido a diversas medidas de conservación del entorno [9]. La batimetría del río, tal y como se describe en se muestra en la Figura 3.1, la cual ha sido obtenida de [3].

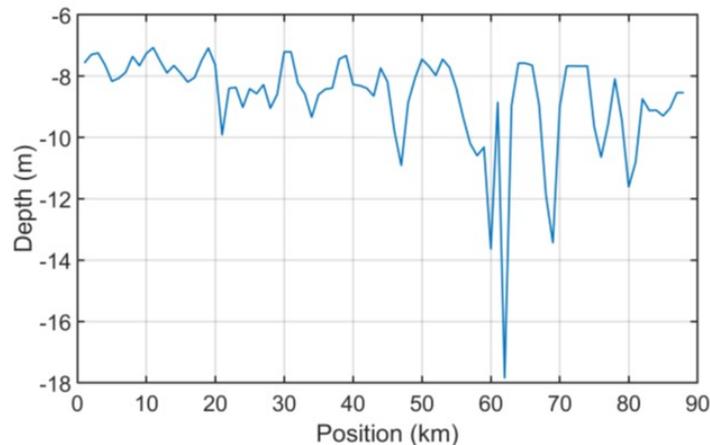


Figura 3.1 Perfil Batimétrico de la ría del Guadalquivir..

3.4 Influencia de la marea

Las mareas son los movimientos periódicos de los mares que tienen amplitud coherente y una relación cíclica con alguna fuerza geofísica periódica. El factor predominante es la variación del campo gravitacional sobre la superficie terrestre debida a los movimientos planetarios regulares en las relaciones tierra-luna-sol, que generan las mareas gravitacionales. Además hay mareas débiles

originadas por variaciones de la presión atmosférica y de las brisas marinas o vientos que van en dirección mar-tierra o viceversa, denominadas mareas meteorológicas.

El forzamiento astronómico de las mareas produce una periodicidad en su ascenso y descenso. La mayor altura alcanzada se denomina pleamar y la menor bajamar. La diferencia entre ellas equivale a la amplitud. El ascenso y descenso del mar en una determinada zona requiere una entrada de agua en las horas previas a la pleamar y una salida en las horas siguientes. Estos movimientos o corrientes mareales corresponden a los flujos (entrantes) y reflujos (vaciantes), respectivamente. El intervalo medio entre pleamares o bajamares sucesivas es de 12 horas y 25 minutos aproximadamente, lo cual denominamos periodo mareal. La hora de pleamar o bajamar se retrasa en 50 minutos entre un día y el siguiente y se relaciona con la luna, pues también ésta se retrasa diariamente 50 minutos en su paso por el meridiano.

La duración media de un ciclo de marea corresponde a la mitad de un día lunar medio. Las alturas de dos pleamares o bajamares consecutivas son generalmente distintas. La desigualdad puede ser tan grande, que sólo parece que se presentara una pleamar y una bajamar cada día lunar, en lugar de dos. De ahí se originen mareas mixtas y diurnas.

Tal y como hemos comentado en apartados anteriores, la marea que caracteriza al estuario del Guadalquivir es de tipo semidiurno, es decir, tiene dos mareas altas y dos mareas bajas con altura casi igual diariamente.

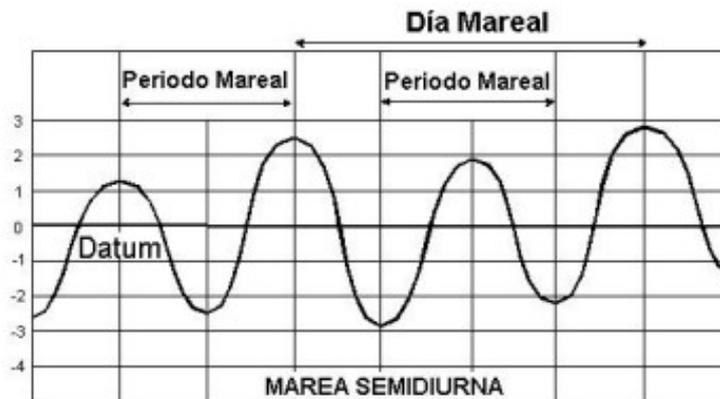


Figura 3.2 Desnivel en mareas de tipo semidiurno.[2].

Las variaciones que produce la marea en el nivel del agua junto con la batimetría, son los dos parámetros fundamentales que afectan los experimentos llevados a cabo en el presente trabajo. Al estar la marea condicionada por determinados ciclos temporales, climatológicos y estacionales, la planificación se encuentra a merced de éstos para aportar una solución óptima y admisible para cada una de las embarcaciones que se quieran adentrar o regresar del puerto de Sevilla. La profundidad del río Guadalquivir para un período de una semana se muestra en la Figura 3.3. En este se enfrenta el tiempo en horas, la profundidad, y la posición en kilómetros. Para obtener dicha gráfica de profundidad se han utilizado los modelos de primeros principios descritos en [10].

3.5 Entorno biológico

3.5.1 Efectos antropogénicos

Los estuarios son sistemas costeros que se caracterizan por el intercambio de energía, sal, sedimentos y otras sustancias entre el mar y la cuenca fluvial. Estos sistemas albergan algunos de los ecosistemas más productivos de la Tierra que sustentan importantes actividades ambientales, sociales y económicas. Debido a todas estas condicionantes, son diversos los intereses que se enfrentan a la

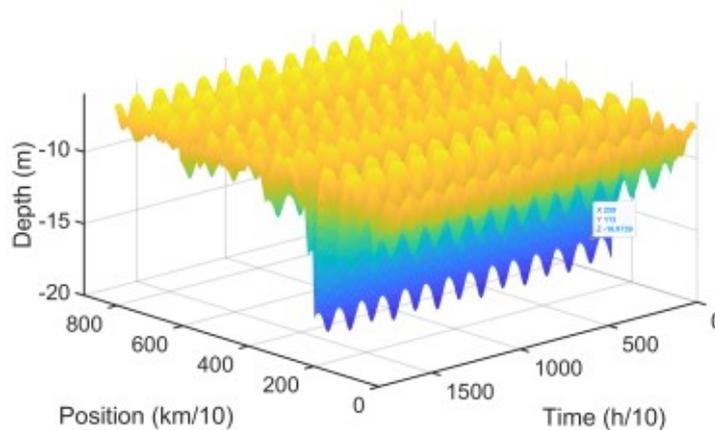


Figura 3.3 Niveles de la marea.

hora de sacar el máximo partido al estuario. La incesante actividad humana alrededor del mismo han producido a lo largo del tiempo importantes modificaciones que afectan a sus características hidrodinámicas, a su morfología y a propiedades bioquímicas del ecosistema.

Estas modificaciones se han realizado para favorecer la navegación del río y al riego de diversas plantaciones de cultivo. Esto ha ido acompañado de la construcción de presas, esclusas, etc, ue permitan una determinada regulación en el riego y la seguridad frente a inundaciones de las instalaciones cercanas al cauce del río. ada una de estas modificaciones tiene un impacto directo en el comportamineto y fauna del río, como es el caso del efecto de resonancia que ejercen estas construcciones en los niveles de la marea, así como la desaparición de todas las marismas debido a la construcción de plantaciones agrícolas en las mismas. Esto no resulta indiferente para los distintos organismos medioambientales, que mediante diversos estudios han podido observar como la calidad del agua y la fauna han sido gravemente afectados. Un claro ejemplo es como han propiciado estos cambios un estado de hipeturbidez en el agua, o como ha sido aislado el Parque de Doñana de las cualidades biológicas que le aportaba el cauce del río. Más infomación puede ser consultada en [10].

Todo este tipo de elementos son el motivo el cual en la actualidad el dragado del río se encuentra altamente legislado. El dragado del río se puede entender como la aplicación de una excavación en el fondo del río de manera que este pueda tener una mayor profundidad para que los barcos puedan pasar sin problemas de calado por el mismo, sin tener que depender de las restricciones horarias que impone la marea. Según diversos estudios medioambientales señalan, un dragado del río tiene diversas repercusiones. Entre ellas podemos destacar:

- Cambios en la concentración de salinidad, repercutiendo de sobremanera al gradiente salínico.
- Alteración de parametros fisicoquímicos y biológicos.
- Variabilidad en la relación de los isótopos carbono y nitrógeno(C/N).

3.5.2 Distribución de la sedimentación

Los sedimentos que constituyen la ría estan consitiudos fundamentalmente por arena fina y barro, que se producen debido a los aportes terrígenos del río Guadalquivir y las condiciones hidrodinámicas del Golfo de Cádiz, con corrientes predominantes hacia el este. Estas corrientes proceden de la superficie acuática del Atlántico Norte, las cuales tienen un gran efecto en la distribución de la sedimentación[4].

4 Problema a resolver

Descrito el entorno y la ubicación que nos concierne, pasamos a describir de una manera mas concreta el problema que proponemos resolver en este proyecto. Como ya se ha comentado anteriormente, el hecho de que el puerto de Sevilla sea un puerto de interior conlleva un acceso a través de la ría del Guadalquivir. Esto requiere que la navegación por la misma esté sujeta a diversos factores como la anchura del río, la batimetría o la influencia de la marea a lo largo de las horas del día.

Para llevar a cabo una planificación correcta del tráfico marítimo en la ría del Guadalquivir, se propone en este proyecto un algoritmo el cual permite realizar esta planificación de manera rápida, automatizada y óptima, teniendo en todas y cada una de las distintas restricciones a las que la ría se encuentra sujeta, de manera que las distintas embarcaciones puedan llegar de una manera segura en el menor tiempo posible a su destino, bien sea el propio puerto de Sevilla o la desembocadura del Guadalquivir. Esta planificación necesita conocer la hora a la que se estima que los barcos se encuentran disponibles para comenzar su navegación en la ría, las características de las distintas embarcaciones, y el estado y profundidad de la ría durante toda la ventana temporal considerada en la replanificación.

Por otra parte, este algoritmo no solo se encarga de una planificación sino tambien de desempeñar las replanificaciones necesarias, en caso de que se produzcan imprevistos, como es el caso del retraso de uno o mas barcos, o fallos en el transcurso de las embarcaciones por la ría, donde frecuentemente se producen sobrecalentamientos en el motor que conllevan cambios en la velocidad y por tanto en los tiempos de tránsito por el canal.

Para abordar estas replanificaciones, en el presente trabajo se consideran diferentes estrategias, a saber:

- Replanificación convencional.
- Replanificación completa fuera de línea.
- Replanificación en tiempo real.

4.1 Estado del arte

En esta sesión presentamos una serie de trabajos significantes donde se ha abordado el problema de planificación de barcos en canales de acceso a puerto siguiendo diferentes filosofías.

4.1.1 Problema de programación difusa de buques en vías navegables de un solo sentido

Este trabajo tiene como objetivo principal minimizar el tiempo de espera de los barcos y mejorar la eficiencia del tráfico en rutas marítimas de interior en un único sentido navegable[6] . Las distintas etapas del proceso de estudio propuesto en este trabajo se representan de manera gráfica en la Figure 4.1.

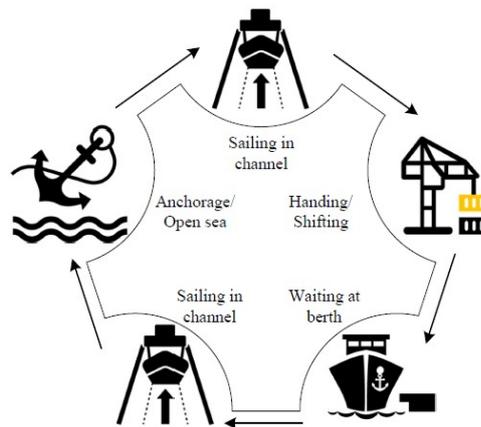


Figura 4.1 Fases del tránsito. Imagen sacada de [6] .

Para la resolución de este tipo de problema se propone un modelo capaz de hacer frente a la aparición de factores inesperados, fundamentalmente cambios de velocidad en los navíos. Este problema es resuelto mediante un algoritmo basado en la denominada lógica difusa y un algoritmo de optimización genética, donde entran en juego un número triangular difuso para establecer la factibilidad del modelo. Las restricciones que tienen en cuenta en este problema son el ancho del cauce del río navegable, la velocidad de los barcos y la posibilidad de que se produzca un retraso en los barcos debido a un fallo en los mismos. Se menciona que en gran medida la elaboración de las secuencias de entradas y salidas de los barcos y la coordinación del tráfico se hace normalmente de manera manual, lo que conlleva a los supervisores del puerto un derroche de energía y tiempo. Además, se resalta que debido a que la navegación es una relación hombre-máquina, existen cierta ambigüedad a la hora de calcular los tiempos que en un principio ya estaban estipulados. Teniendo en cuenta todo esto, en este artículo intentan calcular las ventanas de amplitud temporales factibles basadas en la amplitud de la marea y la distancia entre el fondo del canal y la superficie inferior de la embarcación.

Tal y como se detalla en este artículo, el problema se centra fundamentalmente en el estudio de la factibilidad sujetos a los cambios de velocidad y en la distancia de seguridad entre navíos. Esto constituye una parte del estado del arte de nuestro proyecto, pero no es un sinónimo del mismo. Esto se debe, entre otras cosas, a que se trata de una ruta marítima de un único sentido navegable, y por tanto el algoritmo de planificación no tiene que tener en cuenta ciertas maniobras entre embarcaciones como son los cruces de barcos viajando en sentido contrario.

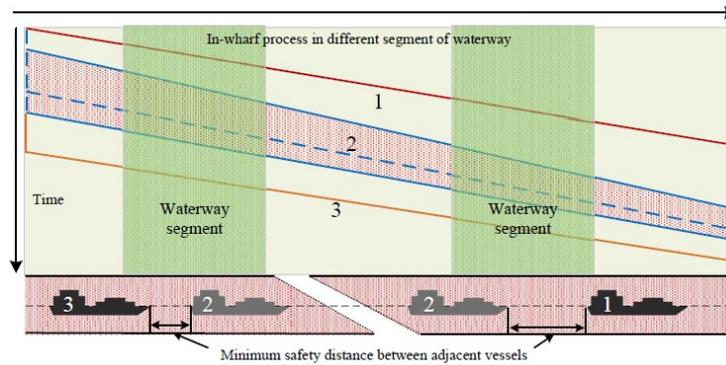


Figura 4.2 Secciones limitadas temporalmente por distancia de seguridad. Imagen sacada de [6].

4.1.2 El problema de la planificación del tráfico marítimo interior

en este interesante trabajo se lleva a cabo la planificación de embarcaciones navegando en rías de doble sentido sujetas al estado de la marea. Concretamente en este artículo se realiza una planificación del tráfico marítimo interior en el estuario de Yangtze, donde se encuentra uno de los puertos más importantes de China [5]. Este cuenta con la peculiaridad de que posee dos tramos de recorrido con características completamente distintas en cuanto a dimensiones se refiere. Por una parte está el "pasaje sur" cuya profundidad es de 5.5 metros y su ancho de cauce es de 250 metros, el cual permite la circulación de dos barcos en cada sentido, y por otro lado "pasaje norte", el cual cuenta con 12.5 metros de profundidad y 80 metros de ancho, el cual, a diferencia del sur, solo permite cruzar un único barco en cada sentido.

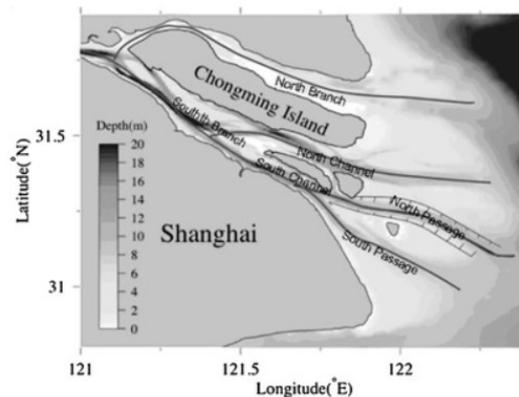


Figura 4.3 Mapa del estuario de Yangtze. Sacada de [5].

El procedimiento regular que deben seguir las embarcaciones para pasar a lo largo del pasaje sur y el pasaje norte queda escenificado en la figura 4.10, donde se muestra simplificada como actúan los barcos en el caso de que deseen entrar o salir del puerto, donde el bloque nombrado como "containers terminals" representa el puerto.

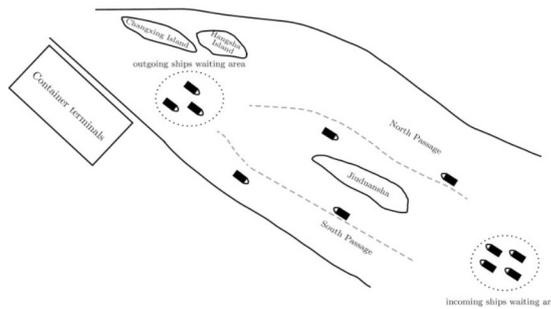


Figura 4.4 Procedimiento de paso.Sacada de [5].

Los dos pasajes están divididos en dos líneas discontinuas. En cada pasaje esta permitido como máximo la circulación de dos barcos en diferentes direcciones. Esto está sujeto a las condiciones de anchura, profundidad y a las condiciones del tiempo. Por otra parte se cuenta con dos zonas de espera, una para la salida y otra para la entrada a puerto, en las que los tiempos de entrada y de salida dependen del estado de la marea. Para mostrar un orden lógico que siguen estos barcos a la hora de planificar las entradas y salidas de los navíos, la metodología mostrada en el diagrama de la Figure 4.5 e sutilizada.

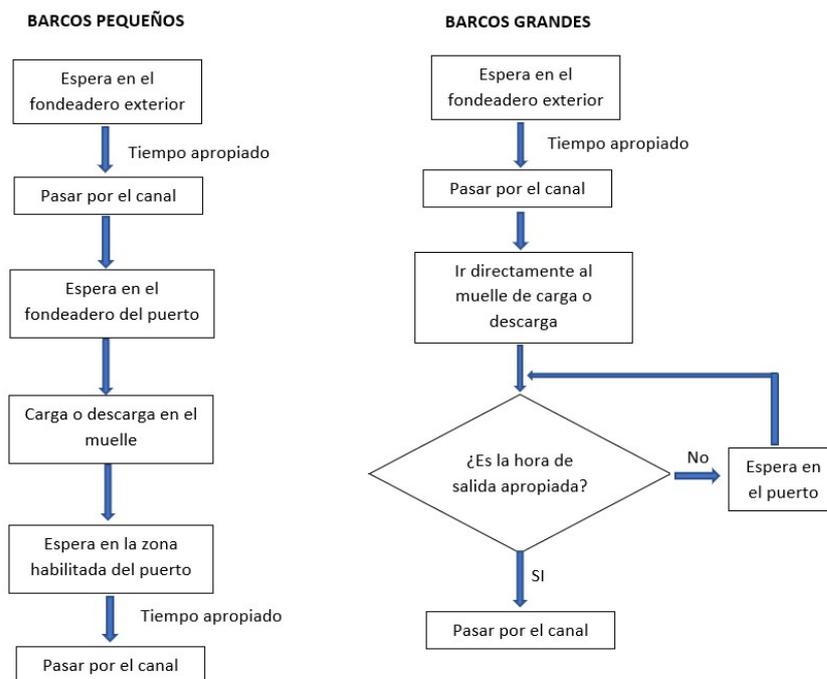


Figura 4.5 Diagrama de decisión del estuario de Yangtze.Realizada traduciendo de [5].

En dicho trabajo, se consideran barcos pequeños aquellos que tienen siete, o menos metros de calado, y barcos grandes aquellos que tienen más de siete metros de calado. Al igual que en nuestro proyecto, en este artículo la marea es un punto fundamental a tener en cuenta en la planificación del tránsito. Se resalta que un mal estado de la marea puede conllevar grandes tiempos de espera en los barcos, lo cual genera tanto problemas de planificación como medioambientales. En el estuario de Yangtze la repercusión que tienen los dos picos de marea conlleva una variación de hasta 2 metros de profundidad aproximadamente. Así, por ejemplo, en el punto más bajo de la marea, el máximo calado permitido es de 11 metros, mientras que sin embargo en el punto más alto de la marea, se permite la circulación de barcos con hasta 13 metros de calado. En términos de

la formulación del problema, se analizan a continuación las variables utilizadas en este trabajo debido al interés que tiene este problema por su semejanza al propuesto en el presente trabajo. Este algoritmo de optimización depende de siguientes variables: el número de barcos ascendentes viene dado por $V_1=\{1,2,\dots,v_1\}$, los descendentes por $V_2=\{1,2,\dots,v_2\}$, el número de caminos disponibles $W=\{1,2,\dots,w\}$, y el número de escalones de tiempo por $H=\{1,2,\dots,h\}$.

Se considera un horizonte temporal de un día con la variación de marea que conlleva. El WSSP (Waterway Ship Scheduling Problem) asigna para cada barco $i \in V_1 \cup V_2$, un tiempo estimado de llegada ETA_i , un tiempo estimado de salida ETD_i , anchura w_i , longitud l_i , calado d_i y, dependiendo del camino asignado $k \in W$, un tiempo de tránsito $t_{i,k}$. Por otro lado, cada camino $k \in W$ tiene una ventana de tiempo $[s^k, e^k]$, con una anchura ϕ_k , y una profundidad, α_k^h , que depende del escalón de tiempo, $h \in H$. El objetivo del WSSP es determinar una planificación factible para los barcos que entran o salen de puerto de manera que se minimicen los tiempos de espera, y que el tiempo total requerido por los barcos para pasar por el canal sea mínimo.

Las hipótesis que engloban este caso son:

- Cada barco $i \in V_1 \cup V_2$ solo puede ser planificado después del tiempo de llegada ETA_i , y tiene que estar planificado e ir a través del canal cuando es el tiempo de salida ETD_i .
- Cada barco $i \in V_1 \cup V_2$ puede ser asignado solamente a un camino $k \in W$ después de que llegue el tiempo s^k y teniendo en cuenta que tiene como límite el tiempo e^k para empezar a acometer ese trayecto.
- El calado de un barco, d_i $i \in V_1 \cup V_2$, debe ser al menos de la profundidad del agua en ese momento del camino asignado, α_k^h $k \in W, h \in H$.
- El subconjunto de los barcos que entran o salen, $V' \subseteq V_1 \cup V_2$, pueden ir a lo largo de un camino $k \in W$ simultáneamente si la suma de sus anchos pueden proporcionar una distancia de seguridad con respecto a lo ancho del camino $k \in W$. Es decir, $\sum_{i \in V'} w_i \leq \phi_k$ si la distancia de seguridad es relajada.

Comentadas las variables que entran en juego en este algoritmo y las hipótesis relacionadas con las mismas, pasaríamos a las restricciones del problema, pero ya sería ahondar demasiado en cuanto nos incumbiere, puesto que al fin y al cabo el propósito de este apartado es el estudio de estado del arte, y ver como nuestro proyecto se sitúa con respecto a otros similares.

4.1.3 Planificación de la navegación en rías con restricciones de marea

En este trabajo analizamos la propuesta desarrollada en [7], la cual se centra también en el río Guadalquivir. La planificación de la navegación de embarcaciones a lo largo del río es una cuestión compleja que puede afectar a la eficiencia de los puertos de interior y a las cadenas intermodales asociadas al mismo. La disponibilidad de agua representa una restricción significativa para la accesibilidad al puerto, teniendo un impacto en los tiempos de espera, costes e incluso seguridad. Este artículo presenta un procedimiento heurístico para planificar la navegación de las embarcaciones sujetas a la marea, y el cual busca la optimización de esta navegación acorde a una función objetivo multicriterio que tiene en cuenta el número de barcos, el tiempo total de espera, el tiempo de tránsito en el río, y el número de operaciones de cruce, donde el término cruce hace referencia a como las embarcaciones que suben y bajan la ría se encuentran en sentidos distintos. Este procedimiento requiere un paso previo de estimación en tiempo real de la profundidad del agua, el cual identifica los puntos críticos o cuellos de botella de la navegación a través de la ría, y contempla la posibilidad de que las embarcaciones tengan que anclar en mitad del trayecto y esperar a la siguiente ventana de marea. La metodología propuesta se valida mediante la aplicación a una serie de escenarios reales, y mostrando la bondad de los resultados obtenidos en términos de rendimiento y calidad en la solución.

Este tipo de planificación se aplica todos los días, tanto para los barcos que salen de puerto, como a aquellos que quieren llegar al mismo. Cada barco consta de unas dimensiones diferentes y una

velocidad promedio, y disponen de unos tiempos diferentes para las cuales estan disponibles para comenzar su trayecto. El canal del río varía de anchura a lo largo del mismo al igual que cambia su profundidad, que viene definida por el perfil batimétrico, definiendo así una serie de puntos críticos que corresponden a los puntos donde la profundidad del río es mas restrictiva para el paso de los barcos. Finalmente, la profundidad con la que se navega cambia debido a la influencia de la marea.

Con estos condicionantes, el proceso de planificación consiste en determinar el mejor plan de navegación, es decir, la mejor secuencia que pueden seguir los barcos que estan interesados en circular tanto aguas arriba como aguas abajo en el río, asignandoles ranuras de tiempo para iniciar su viaje y pasar por los diferentes puntos críticos a lo largo de la ría sin problemas de seguridad. Este proceso debe considerar que el cruce de embarcaciones y las maniobras de adelantamiento solo pueden tener lugar en zonas donde el ancho del canal es suficiente, y que en ningun caso los barcos que poseen un dimensiones de gran calibre no pueden cruzarse o ser adelantados por ninguna otra embarcación en cualquier tramo del rio. A este tipo de barcos lo denominan sobredimensionados, que en el caso de estudio, la ría del Guadalquivir, son aquellos con una longitud superior a 160 metros. Adicionalmente, es posible identificar las areas de anclaje en el río, las cuales servirán como buffers de tráfico en el caso de que un barco no sea capaz de completar la ruta de navegación mientras la profundidad del agua sea todavía suficiente. Estas áreas de anclaje pueden ser descritas como aquellas donde la profundidad del agua deberia ser suficiente para cualquier barco en cualquier ventana de marea. Por estas razones, el horizonte de planificación debe incluir mas de una ventana de marea, así como que las embarcaciones sean forzadas a parar su recorrido y esperar en una de las areas de anclaje a que la marea vuelva a crecer.

Para escenificar el proceso de planificación se desarrolla un diagrama de bloques que opera de manera secuencial, para determinar el plan de navegación en el horizonte temporal implementado, tal y como se muestra en la Figura 4.6

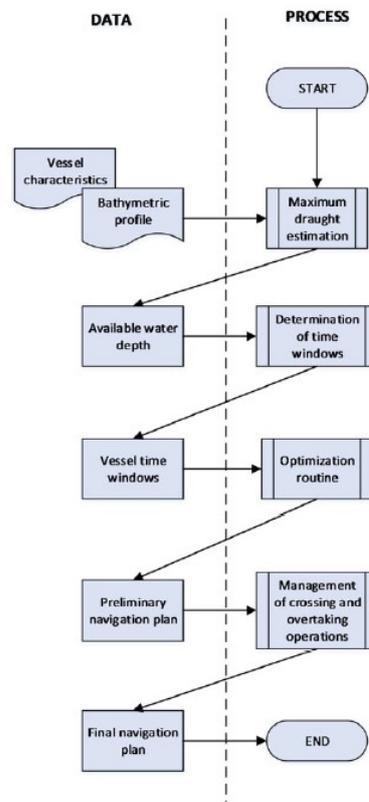


Figura 4.6 Descripción esquemática de los módulos operantes. Imagen extraída de [7].

Pasando a analizar el perfil batimétrico del canal, el cual es necesario estudiar para establecer rutas seguras en el plan de navegación, se desarrolla el siguiente procedimiento. En primer lugar, se obtiene el perfil batimétrico mediante el escáner de un sonar a lo largo del fondo del río. Este perfil permite determinar el número y la localización de los puntos críticos, donde la distancia entre el fondo y la superficie del agua es mínima.

Si a este perfil le sumamos el efecto de la ola de marea, supone una adición que nos indica cual es la profundidad disponible en cada uno de los puntos del trayecto en función de las horas del día, ya que el perfil batimétrico se mantiene constante, pero sin embargo la marea varía en función de la hora del día en la que nos encontremos. Matemáticamente este queda expresado de la siguiente manera: $h_i(x,t)=h_1(x)+h_2(x,t)-c_i$, donde $h_i(x,t)$ es una variable que indica el máximo calado permisible para el barco i que depende de la posición x del trayecto y de un determinado tiempo t , la variable $h_1(x)$ representa la profundidad disponible entre el nivel de referencia de medida y el fondo del río, manteniéndose constante en algunos tramos donde no se ha tenido en cuenta el proceso de sedimentación del río. Por otro lado $h_2(x,t)$ es la altura entre la superficie del agua y el nivel de referencia, y depende tanto de la ubicación como del tiempo, debido a la naturaleza dinámica de la marea. En último lugar nos queda comentar la variable c_i que es única para cada barco i representa el calado del mismo.

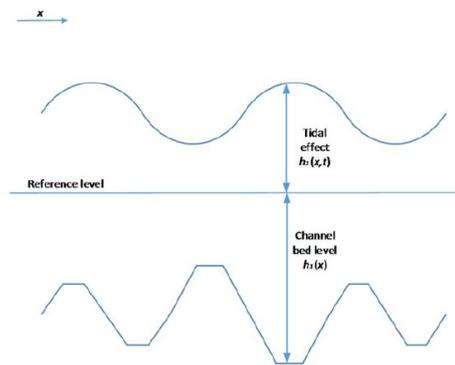


Figura 4.7 Componentes de la estimación de la profundidad del agua. Extraída de [7].

Comenzando por la determinación de las ventanas de tiempo asignadas a las embarcaciones, con lo que se busca determinar los intervalos de tiempo por los cuales cada embarcación puede navegar por cada uno de los puntos críticos.

El paso crítico del algoritmo propuesto es la determinación de las ventanas temporales asignadas a cada una de las embarcaciones para realizar el tránsito a través de los diferentes puntos críticos detectado mediante la medición de la batimetría. Para el cálculo de estas ventanas, los siguientes parámetros son empleado:

- $num_vessels$: número de barcos a planificar
- $num_critical_points$: número de puntos críticos
- $num_anchoring_areas$: número de áreas de anclaje
- ETA_i : tiempo estimado de llegada del barco i
- ETD_i : tiempo estimado de partida del barco i
- d_i : calado del barco i
- v_i : velocidad media del barco i
- $num_time_windows$: número de ventanas temporales

El horizonte de planificación comprende un determinado número de ciclos de marea, pretendiéndose así que cada barco tenga más de una ventana de tiempo para cada punto crítico, típicamente una por ciclo de marea. El algoritmo comienza con la determinación de las ventanas temporales de navegación individuales $[it_{ije}, it_{ijl}]$ para cada barco i en el punto crítico j . Las siguientes restricciones son impuesta para tal fin:

$$it_{ije} = t \quad \text{when} \quad d_i = h_i(x_j, t) \quad \text{and} \quad h_2(x_j, t) > h_2(x_j, t - 1)$$

$$it_{ijl} = t \quad \text{when} \quad d_i = h_i(x_j, t) \quad \text{and} \quad h_2(x_j, t) < h_2(x_j, t - 1)$$

Una vez calculadas las ventanas temporales individuales, éstas se usan para determinar la combinación de tiempos de ventana $[ct_{ije}, ct_{ijl}]$ para cada barco i y el punto crítico j . Esta combinación de los tiempos de las ventanas corresponden a los intervalos de tiempo durante los cuales cada barco necesita pasar a lo largo de cada punto crítico con el fin de garantizar que va a completar su trayecto pasando también sin embargo todos los puntos críticos entre los tiempos de la ventana temporal. La determinación de estas ventanas es llevado a cabo por una secuencia de retroceso, donde $num_points = num_critical_points + num_anchoring_areas + 2$. El número 2 incluido en la ecuación es para tener en cuenta los puntos de control correspondientes al estuario y a la esclusa del puerto.

Sin entrar en demasiado detalle en la configuración del código, pasamos a mostrar la estructura fundamental mostrada en el artículo:

```
% Start Optimization Algorithm
for i=1:num_vessels
    for j=1:(num_critical_points+num_anchoring_areas)
        Determine individual time windows as time intervals when  $d_i \leq h_i(x_j, t)$ 
    end
    for z=1:num_time_windows
        Calculation of combined time window for vessel i
        Calculation of final time window for vessel i
    end
end
% End Optimization Algorithm
```

Figura 4.8 Inicialización del código.[7].

```
% Start calculation of combined time windows for upstream vessels
if vessel_direction == upstream
    for j=1:num_points
        for s=1:num_critical_points+num_anchoring_areas
            if j is upstream from s, then
                displaced_lower_bound(j,s) =  $it_{je} + distance(j,s)/v_i$ 
                displaced_upper_bound(j,s) =  $it_{jl} + distance(j,s)/v_i$ 
            elseif j is downstream from s, then
                displaced_lower_bound(j,s) =  $it_{je} - distance(j,s)/v_i$ 
                displaced_upper_bound(j,s) =  $it_{jl} - distance(j,s)/v_i$ 
            end
        end
    end
end
% End calculation of combined time windows for upstream vessels
% Start calculation of combined time windows for downstream vessels
elseif vessel_direction == downstream
    for j=1:num_points
        for s=1:num_critical_points+num_anchoring_areas
            if j is upstream from s, then
                displaced_lower_bound(j,s) =  $it_{je} - distance(j,s)/v_i$ 
                displaced_upper_bound(j,s) =  $it_{jl} - distance(j,s)/v_i$ 
            elseif j is downstream from s, then
                displaced_lower_bound(j,s) =  $it_{je} + distance(j,s)/v_i$ 
                displaced_upper_bound(j,s) =  $it_{jl} + distance(j,s)/v_i$ 
            end
        end
    end
end
% End calculation of combined time windows for downstream vessels
end
```

Figura 4.9 Resumen del algoritmo utilizado.[7].

Por último, es interesante ver un ejemplo de como se realizan las combinaciones de las ventanas temporales para asegurar un trayecto factible a través de todos los puntos críticos comprendidos desde la esclusa del puerto a la desembocadura y viceversa.

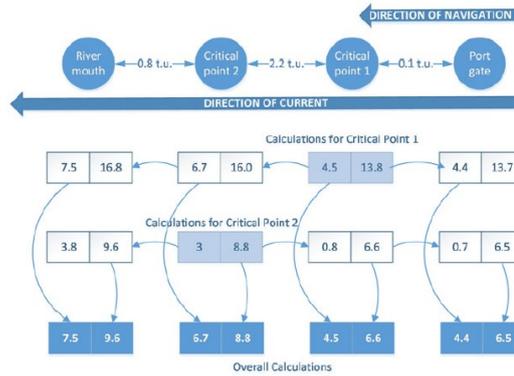


Figura 4.10 Ejemplo combinación ventanas temporales. Imagen extraída de [7].

4.2 Base teórica del proyecto

En este subapartado se detalla el algoritmo de planificación utilizado y desarrollado en el enclave de este proyecto para la planificación de las embarcaciones en la ría del Guadalquivir. Supóngase que el canal por el cual circulan los barcos está dividido en Z secciones en las cuales cada sección p , con $p=1, \dots, Z$, está caracterizada por su distancia $d(p)$, una velocidad máxima por la que pueden circular por esa sección $\mu(p)$ y la anchura mínima de la sección $w(p)$. El canal tiene una circulación de doble sentido. El número total de barcos navegando por la ría viene dado por las variables N_u y N_d , indicando respectivamente el número de barcos que van aguas arriba y aguas abajo. Cada uno de estos barcos está caracterizado por su calado $\delta(i)$ denotando la i el índice del barco en cuestión, $i \in 1 \dots N_u + N_d$.

Una opción posible es el control de la velocidad de cada barco usando un tiempo o espacio discretizado, sin embargo, esta aproximación acarrea una gran complejidad en términos de optimización. En la formulación propuesta, las variables de decisión son los tiempos en los cuales cada barco cruza los límites comprendidos entre cada sección, incluidos los que se encuentran al principio y al final del trayecto navegando aguas arriba, $p=0$ y $p=Z$, respectivamente. Estos tiempos que se mencionan son denotados como $t_{i,p}$ con $i=1, \dots, N_u + N_d$ y $p=0, \dots, Z$. Esta selección de variables de decisión hace posible que el modelo considere todas las restricciones de manera eficiente. Es importante recalcar que la secuencia de tiempos $t_{i,p}$ crece mientras p disminuye cuando el barco va aguas abajo, y viceversa cuando va aguas arriba.

4.2.1 Función de coste

El principal propósito del problema a resolver es la minimización del tiempo que los barcos pasan navegando por la ría, así como el tiempo que los barcos están esperando antes de que tengan permitido entrar a la ría. El tiempo el cual cada barco i con $i=1, \dots, N_u + N_d$ está preparado para entrar al río viene dado por t_i^{ready} . Una vez detallado esto podemos escribir la función objetivo como sigue:

$$J = \underbrace{\sum_{i=1}^{N_u} (t_{i,Z} - t_{i,0}) + \sum_{i=N_u+1}^{N_u+N_d} (t_{i,0} - t_{i,Z})}_{\text{Coste de transito}} + \underbrace{\sum_{i=1}^{N_u} (t_{i,0} - t_i^{ready}) + \sum_{i=N_u+1}^{N_u+N_d} (t_{i,Z} - t_i^{ready})}_{\text{Coste de espera}}. \quad (4.1)$$

4.2.2 Restricciones de velocidad

La máxima velocidad a la cual cada barco puede navegar por la sección p es definida por $\mu(p)$. Esta velocidad limita la mínima cantidad de tiempo necesaria requerida para navegar en cada sección. Esta

restricción puede ser formulada como sigue:

$$\mu(p) \geq \frac{d(p)}{t_{i,p+1} - t_{i,p}} \quad (4.2)$$

$$t_{i,0} > t_i^{ready}, \quad (4.3)$$

$$p = 0, \dots, Z-1, i = 1, \dots, N_u, \quad (4.4)$$

$$\mu(p) \geq \frac{d(p)}{t_{i,p} - t_{i,p+1}}, \quad (4.5)$$

$$t_{i,Z} > t_i^{ready}, \quad (4.6)$$

$$p = 0, \dots, Z-1, \forall i = N_u + 1, \dots, N_u + N_d. \quad (4.7)$$

4.2.3 Restricciones de cruce

En principio, los cruces entre los barcos podrían ocurrir en cualquier sección de la ría, dependiendo de sus velocidades y de sus tiempos de partida. Hay que tener en cuenta que el cruce entre los barcos en ciertas secciones del río es posible si la suma de sus anchuras es menor que el ancho de la sección, por cada pareja de barcos navegando en distintos sentidos, una variable de decisión binaria $c_{i,j,p}$ es utilizada, y las siguientes restricciones son impuestas, donde M es un número muy grande:

$$t_{i,p} \leq t_{j,p} + M \cdot \sum_{l=0}^p c_{i,j,l}, \quad (4.8)$$

$$t_{j,p} \leq t_{i,p} + M \cdot (1 - \sum_{l=0}^p c_{i,j,l}), \quad (4.9)$$

$$i = 1, \dots, N_u, j = N_u + 1, \dots, N_u + N_d, p = 0, \dots, Z, \quad (4.10)$$

$$\sum_{p=0}^Z c_{i,j,p} \leq 1, \quad (4.11)$$

$$c_{i,j,p} = 0 \quad \text{if} \quad b(i) + b(j) > w(p), \quad (4.12)$$

$$i = 1, \dots, N_u, j = N_u + 1, \dots, N_u + N_d, p = 0, \dots, Z. \quad (4.13)$$

Estas restricciones asumen que los barcos que navegan aguas arriba cruzan todas los limites de las secciones anteriores hasta que los barcos que navegan aguas abajo llegan al límite p en el cual $c_{i,j,p}$ toma el valor de 1, donde los barcos que mavegan aguas abajo han cruzado todos los limites posteriores que tiene por recorrer dicho barco que va aguas arriba con el que realiza el cruce. Los barcos no se cruzan entre sí, si todas las variables de xruce son igual a cero. Este es el caso que se produce cuando el barco i llega al final del trayecto antes de que el barco j haya partido. Estas embarcaciones no se cruzan si $c_{i,j,0}=1$, que es el caso que se produce couando el barco j llega a $p=0$ antes de que parta el barco i . Todos los valores posibles quedan representados en la figura 4.11 donde se muestra un ejemplo sencillo con tres secciones. En esta figura, el eje horizontal representa la distancia que existe entre los límites de las secciones, mientras que el eje y representa el tiempo,

donde el tiempo inicial del problema de planificación se sitúa en la parte superior de la figura. Las trayectorias que siguen las embarcaciones quedan ilustradas por líneas negras discontinuas, y los cruces por estrellas amarillas.

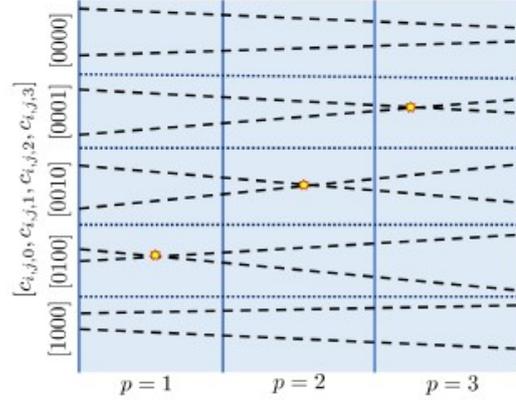


Figura 4.11 Ejemplo de funcionamiento de las variables $c_{i,j,p}$.

4.2.4 Restricciones de adelantamiento

Para tener en cuenta las maniobras de adelantamiento se introducen unas nuevas variables de decisión escritas como $o_{i,j,p}$ para cada par de barcos i e j que navegan en la misma dirección. Si esta variable toma el valor uno, el barco i cruza el perímetro de la sección p antes que el barco j . En el caso contrario, es decir, que la variable valga cero, significa que el barco j lo cruza primero. Si los barcos i e j no pueden adelantarse debido a la anchura de la sección p , entonces $o_{i,j,p-1} = o_{i,j,p}$, lo que implica que su orden se mantiene.

Para los barcos que navegan aguas arriba se añaden las siguientes restricciones:

$$t_{i,p} \leq t_{j,p} + \Delta_o + M \cdot o_{i,j,p}, \quad (4.14)$$

$$t_{j,p} \leq t_{i,p} + \Delta_o + M \cdot (1 - o_{i,j,p}), \quad (4.15)$$

$$i = 1, \dots, N_u, j = N_u + 1, \dots, N_u + N_d, p = 0, \dots, Z, \quad (4.16)$$

$$o_{i,j,p-1} = o_{i,j,p} \quad \text{if} \quad b(i) + b(j) > w(p). \quad (4.17)$$

donde Δ_o es el mínimo intervalo de tiempo entre que el primer barco del par cruza cada punto y el segundo lo hace. Es de notar que todas estas restricciones tienen en cuenta todos las posibles parejas de barcos que navegan en el mismo sentido. Una vez comentado esto, las restricciones de los barcos navegando aguas abajo quedan de la siguiente forma:

$$t_{i,p} \leq t_{j,p} + \Delta_o + M \cdot o_{i,j,p}, \quad (4.18)$$

$$t_{j,p} \leq t_{i,p} + \Delta_o + M \cdot (1 - o_{i,j,p}), \quad (4.19)$$

$$i = 1, \dots, N_u, j = N_u + 1, \dots, N_u + N_d, p = 0, \dots, Z, \quad (4.20)$$

$$o_{i,j,p+1} = o_{i,j,p} \quad \text{if} \quad b(i) + b(j) > w(p). \quad (4.21)$$

4.2.5 Restricciones de profundidad

Es de suma importancia asegurar que las embarcaciones nunca van a estar situadas en ningún momento en zonas donde la profundidad del canal es inferior al calado de la embarcación en cuestión, lo que en caso de producirse, acarrearía un serio problema.

Tener en cuenta la variabilidad temporal de la profundidad del canal es en general un problema difícil. Para resolver este problema se propone la planificación por tubos. Para resolver esto, para cada barco i considerado, se asume que un conjunto de $K(i)$ tubos de seguridad están disponibles. Estos "tubos de seguridad" se pueden definir como regiones espacio-temporales situadas en el mapa, donde todas las trayectorias dentro de dicha región satisfacen las restricciones de profundidad. Cada tubo está definido por un tiempo máximo y un tiempo mínimo, $t_{i,k,p}^{min}$ y $t_{i,k,p}^{max}$ entre los cuales el barco debe cruzar.

Para decidir el tubo en el cual el barco va a navegar, un conjunto de variables binarias $r_{i,k}$ es tenida en cuenta, con $k=1, \dots, K(i)$, determinando el grupo. Si $r_{i,k}$ toma el valor de 1, entonces el barco i sigue la ruta k . Las otras variables relacionadas con el barco i deben de tomar el valor de cero. Una vez descritas, las restricciones quedan de la siguiente forma:

$$t_{i,p} \leq t_{i,k,p}^{max} + M \cdot (1 - r_{i,k}), \quad (4.22)$$

$$t_{i,p} \geq t_{i,k,p}^{min} - M \cdot (1 - r_{i,k}), \quad (4.23)$$

$$i = 1, \dots, N_u + N_d, \forall k = 1, \dots, K(i), \forall p = 0, \dots, Z, \quad (4.24)$$

$$\sum_{k=1}^{K(i)} r_{i,k} = 1. \quad (4.25)$$

4.2.6 Cálculo de los tubos de seguridad

Por lo general, la obtención de unos "tubos de seguridad" óptimos es un problema difícil de resolver. Aunque este tema quizás vaya más allá de los objetivos de este trabajo, se presenta un exhaustivo método de búsqueda que proporciona soluciones aproximadas.

Para llevar a cabo las simulaciones, se propone el cálculo de estos tubos para garantizar que se cumplen las restricciones de profundidad en los diferentes límites de las secciones de la ría. Para obtener esto, dado el tiempo para el cual un barco i está preparado para comenzar el cualquier momento el trayecto, t_i^{ready} , y el tiempo del que dispone para completarlo, D_L , se calcula el conjunto Q_p con $p=0, \dots, Z$ como el conjunto de ventanas de tiempos en las cuales cada barco i puede cruzar el punto delimitante por p en el periodo de tiempo $[t_i^{ready}, t_i^{ready} + D_L]$. En términos generales, Q_p viene dado por el número cardinal de (Q_p) de diferentes intervalos de tiempo, es decir, está definido por un conjunto de intervalos disjuntos. Se denotan estos intervalos como Q_p^l . Dados estos conjuntos, todos los diferentes tubos k con $k=1, \dots, K(i)$, podrían ser calculados como todas las posibles combinaciones admisibles de las ventanas de tiempo, es decir, todas las posibles combinaciones de los elementos Q_p en $p=0, \dots, Z$. Esto debería un número total de tubos igual a:

$$K(i) = \prod_{p=0}^Z \text{card}(Q_p) \quad (4.26)$$

Este número de posibles tubos crece de manera exponencial con el número de secciones y con la cardinalidad de Q_p y es, en general, muy grande. Para reducir el número de tubos posibles, es importante tener en cuenta las restricciones de velocidad. Únicamente los tubos que pueden alcanzar su destino antes del tiempo $t_i^{ready}, t_i^{ready} + D_L$, satisfaciendo la máxima velocidad permitida. Esto queda representado en la figura 4.13 con un ejemplo sencillo de una canal dividido en tres secciones, donde las ventanas de tiempo mostradas en amarillo representan todas las ventanas de tiempo que pueden ser consideradas admisibles de cara a que formen parte de un tubo seguro, y mostradas en rojo aquellas que a pesar de ser admisibles no pueden formar parte de ningún tubo seguro.

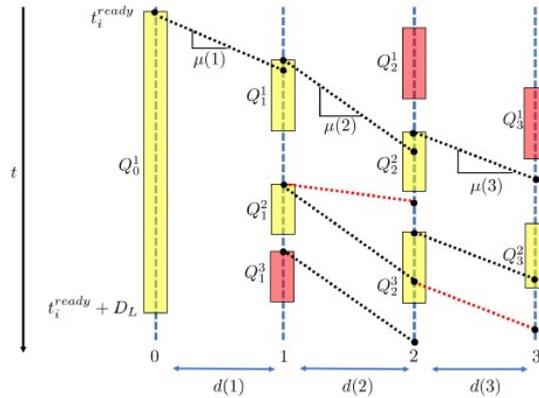


Figura 4.12 Representación del procedimiento seguido para la instauración de tubos seguros y admisibles.

Hay dos razones por las cuales una ventana de tiempo es excluida para formar parte del set de tubos elegibles. La primera razón es porque no puede ser alcanzada con el tiempo inicial dado y las restricciones de velocidad existentes, que son los casos representados por Q_2^1 Y Q_3^1 . La segunda razón es debido a que a pesar de ser alcanzables, es imposible alcanzar el destino antes que el tiempo final dado, incluso navegando a la máxima velocidad permitida, que es el caso mostrado en Q_1^3 . En el ejemplo representado el número total de combinaciones considerando todas las ventanas es 18. Excluyendo Q_2^1, Q_3^1 y Q_1^3 este número se reduce a 4.

Además de excluir estos intervalos que no pueden pertenecer a ningún tubo seguro, es posible excluir algunos más de los resultados de la combinación donde las restricciones de velocidad son consideradas. Por ejemplo, no es posible alcanzar Q_2^2 empezando en Q_1^2 , por lo que el tubo $[Q_0^1, Q_1^2, Q_2^2, Q_3^2]$ pueden ser excluidos. También, este análisis puede considerar el tiempo en el cual cada intervalo es alcanzado en un tubo en particular. Por ejemplo, el tubo $[Q_0^1, Q_1^1, Q_2^2, Q_3^2]$ satisface las restricciones de velocidad, pero el tubo $[Q_0^1, Q_1^2, Q_2^2, Q_3^2]$ puede ser excluido porque Q_3^2 no puede ser alcanzado por Q_1^2 navegando a la máxima velocidad.

Para llevar a cabo las simulaciones, las combinaciones plausibles han sido computadas recursivamente desde la ventana temporal inicial teniendo en cuenta todos los aspectos mencionados en la búsqueda exhaustiva de un conjunto factible. Para el cómputo de las combinaciones de 0 a el parámetro p dado, todas las combinaciones tienen en cuenta los tubos hasta $p-1$ usando los intervalos del conjunto Q_p , sacando de ella todas las nuevas combinaciones que no puedan ser alcanzadas partiendo del inicio indicado.

4.2.7 Parámetros del modelo

El número total de secciones Z es igual a 24, lo que conlleva un total de 25 puntos delimitantes. Cada una de estas secciones está caracterizada por la distancia, la máxima velocidad que pueden

ejecutar los barcos navegando por ella y la anchura, cuyos valores quedan reflejados en la tabla. Es de notar que la anchura de cada sección, en vez de arrojar su medida específica, la discretizamos en el conjunto $[2,4,8]$. Esto indica cuando la sección es considerada pequeña, mediana o grande en términos de anchura. Únicamente los barcos cuyo suma de anchuras, las cuales quedan representadas de forma discreta en el conjunto $[1,2,4]$, es igual o menor que la anchura del río en esa sección pueden cruzarse o adelantarse mutuamente en ese tramo del río.

id	$d(km)$	$\mu(km/h)$	w	id	$d(km)$	$\mu(km/h)$	w
1	1.9	10.1860	1	13	4.2	19.4460	8
2	1.4	16.6680	4	14	4.5	19.4460	1
3	4.5	16.6680	2	15	3.5	22.2240	8
4	4.2	17.5940	4	16	1.2	18.5200	4
5	2.0	17.5940	4	17	3.4	21.2980	4
6	5.2	18.5200	4	18	1.7	23.1500	4
7	6.6	21.2980	4	19	2.0	23.1500	4
8	3.5	21.2980	4	20	4.2	23.1500	4
9	5.9	21.2980	2	21	3.0	22.2240	1
10	5.4	22.2240	4	22	2.2	18.5200	8
11	2.1	22.2240	4	23	4.8	21.2980	1
12	4.7	22.2240	1	24	4.9	21.2980	2

Figura 4.13 Parámetros del río Guadalquivir.

4.2.8 Planificación por nodos

Para llevar a cabo esta planificación por nodos se utilizan unas variables que se simbolizan como N_p^k , que son paralelogramos que se forman usando las ventanas de mareas correspondientes y corresponden a regiones del espacio dentro de las cuales existe al menos una trayectoria tal que dos ventanas de marea se conectan sin violar las restricciones de marea y velocidad. Así de esta manera se conecta un nodo N_{p-1}^k con una ventana de marea Q_p^l por medio del nodo correspondiente N_p^k .

Dado el tubo N_p^k , es posible alcanzar el punto mínimo de su ventana de tiempo de salida, $t_p^{earliest}$, partiendo del punto mínimo de su ventana de tiempo de entrada, t_p^{entry} , donde existe un punto tal que $t_p^{entry*} \geq t_p^{entry}$ perteneciente a la ventana de tiempo de N_p^k donde $t_p^{earliest}$ puede ser alcanzada navegando a máxima velocidad. Igualmente, es posible alcanzar el punto máximo de la ventana de tiempo de salida de N_p^k partiendo de el máximo tiempo de la ventana de tiempo de entrada de N_{p-1}^k , donde existe un punto $t_p^{exit*} \leq t_p^{exit}$, que puede ser alcanzado navegando a la máxima velocidad desde t_p^{latest} .

Algorithm 1 Safe tube tree building algorithm for vessels travelling upstream.

```

1: Obtain waterway depth predictions from  $t_i^{ready}$  to  $t_i^{ready} + D_L$ .
2: Obtain a map of time-space points in which vessel  $i$  may sail.
3: Calculate sets  $Q_p$ .
4: Discard intervals  $Q_p^l$  that are not admissible.
5: for each section  $p$  do
6:   for each node  $k$  in boundary  $p - 1$  do
7:     for each time window  $Q_p^l \subset Q_p$  do
8:       Find all possible safe tubes from  $N_{p-1}^k$  to  $Q_p^l$  carrying out a reachability analysis.
9:       For each tube, add one node to sector  $p$ .
10:    end for
11:  end for
12: end for

```

Figura 4.14 Algoritmo de construcción de tubos de barcos navegando aguas arriba.

Gestión de islas de marea

El algoritmo debe de asegurar las siguientes funcionalidades:

- Encontrar todos los intervalos de tiempo contenidos en la ventana de salida de N_{p-1}^k a partir del cual Q_p^l puede ser alcanzada navegando a la máxima velocidad sin violar las restricciones

de profundidad. El máximo valor de cada una de estas ventanas con $t_p^{latest,r}$, $r \in [1, \dots, R]$, donde R es el número de ventanas de tiempo de salida.

- Para cada ventana de salida, encontrar su ventana de tiempo de salida asociada, la cual es el conjunto de los puntos contenidos en Q_p^l que pueden ser alcanzados navegando a la máxima velocidad sin violar las restricciones de profundidad. Se denota como el valor mínimo de estas ventanas como $t_p^{earliest,r}$.
- Cada ventana de tiempo de entrada y su ventana de tiempo de salida, definen un paralelogramo denominado P_μ^r . Por cada paralelogramo encontrado, se define un nuevo nodo N_p^r , el cual es también un paralelogramo cuyos vértices son $t_p^{entry}, t_p^{exit}, t_p^{latest,r}, t_p^{earliest,r}$, siendo t_p^{entry} y t_p^{exit} el valor mínimo de salida de la ventana de salida del nodo N_{p-1}^k y el máximo valor de Q_p^l respectivamente

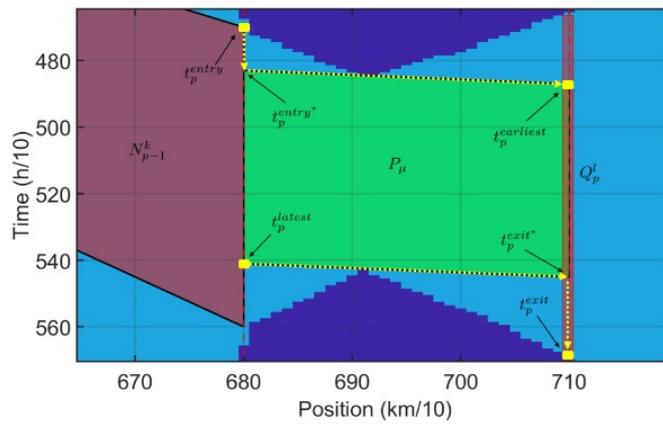


Figura 4.15 Caso paralelogramo P_μ^r .

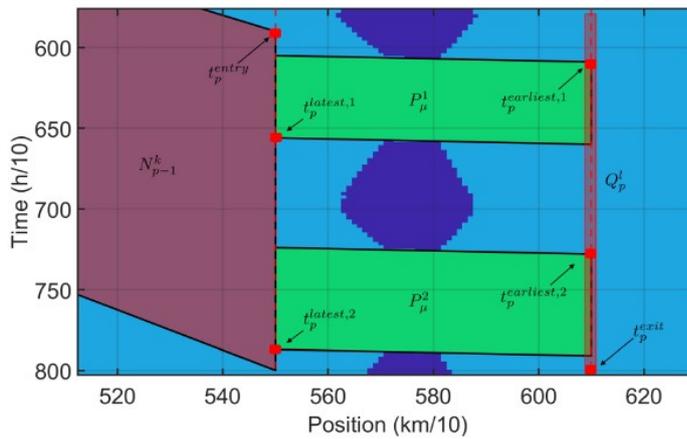


Figura 4.16 Segundo caso paralelogramo P_μ^r .

5 Experimentos y resultados

Entrados en materia en lo que al objetivo del proyecto se refiere, nos queda la base experimental en el cual hemos basado los resultados y conclusiones del proyecto. Para ellos se han hecho una serie de simulaciones iterativas, con la variación de diversos parametros, a través de diferentes códigos ejecutados en Matlab.

5.1 Parámetros

Para comenzar con la descripción de estos experimentos, es primordial el comentar cuales son las variables que entran en juego en estas simulaciones y qué relaciones tienen entre sí. Aunque ya han sido comentadas de manera genérica en el apartado 3.2, consideramos oportuno una descripción más específica en esta sección para una mejor comprensión de los resultados y el entorno de los diversos casos analizados.

En primer lugar mostramos el conjunto de parámetros de entrada de las distintas simulaciones llevadas a cabo:

- *Dead line (DL)*: máxima diferencia de tiempo que puede haber entre la llegada de un barco al río y el tiempo en el cual llega a su destino.
- λ : parámetro que caracteriza la distribución de Poisson utilizada para modelar el intervalo de tiempo entre las llegadas consecutivas de los barcos al río.
- t_{ready} : indica el tiempo en el que un principio los barcos están listos para comenzar el trayecto cuando sea necesario. Al contar durante todas las simulaciones con 4 barcos en total, tendremos por tanto 4 variables asociadas, $[t_{ready}(1), t_{ready}(2), t_{ready}(3), t_{ready}(4)]$. Este conjunto de variables es de suma importancia, debido a que en función de estas, determinará si las embarcaciones son capaces de tomar ventanas de marea más favorables que les permitan circular por el río más rápidamente, y por tanto minimizar los costes.
- *Delay*: representa el retraso establecido supuesto para cada uno de los barcos, estos se añaden a cada uno de los t_{ready} correspondientes a cada uno de los barcos que experimenta retraso respectivamente.
- N : número total de barcos que van a ser planificados.
- n_{up} : señala el número de barcos que navegan aguas arriba en las distintas simulaciones.
- n_{down} : señala el número de barcos que navegan aguas abajo en las distintas simulaciones.
- b_{up} : indica la anchura de los barcos que navegan aguas arriba, de manera que es un parámetro que influye en las restricciones de cruce y de adelantamiento. Esta anchura que puede poseer la embarcación está discretizada en tres valores (1,2,4), desde las anchuras más pequeñas a

las mas grandes respectivamente, las cuales son asignadas de manera aleatoria en cada una de las iteraciones.

- b_{down} : indica la anchura de los barcos que navega aguas abajo, elegidas aleatoriamente entre los valores (1,2,4).
- Z : número de secciones en las que se divide el canal.

Por otra parte, tenemos un conjunto de parámetros que definen el entorno en el que se desarrolla el problema, de manera que son cargadas previamente al desarrollo de todas las simulaciones y que no representan una variable de por sí como tal, sino el escenario donde se recrean estas, que viene a ser el mismo en todas ellas debido a la situación física del río, las restricciones legales, o bien las consideradas necesarias para un desarrollo seguro en todo momento del tráfico marítimo. Estos son las siguientes:

- *Restricciones de velocidad*: matriz que incluye cada una de las restricciones de velocidad existentes en cada una de las secciones del río. En total cuenta con 24 componentes que corresponden a cada uno de los tramos correspondidos a las 25 secciones. Estos límites son constantes en todas las simulaciones.
- *Mapa de marea*: fija una serie de parámetros que condicionan en gran medida el resultado de los experimentos. Esta mapa es cargado al inicio del conjunto de todas las simulaciones, y lo que lleva a cabo es la definición de un entorno de marea en un amplio rango horario, donde indica la admisibilidad espacio temporal que poseen los barcos con un calado de 7,5 metros que quieren realizar una travesía a lo largo del río, ya sea aguas abajo u aguas arriba. El entorno ha sido condicionado por un calado de 7,5 metros debido a que en este ámbito representa la condición mas desfavorable en terminos de profundidad, la cual hemos considerado importante a tener en cuenta de cara a un tráfico plenamente seguro a lo largo de todo el trayecto.
- *Distancia entre secciones*: engloba las distancias existentes comprendidas en cada una de las secciones, las cuales es obviamente necesaria para el desarrollo del análisis de los tiempos como se presento anteriormente en el apartado 3.2.
- *Anchura de los tramos de la ría*: define el entorno físico del ancho del río, donde establece la anchura mas restrictiva en cada una de las secciones, lo cual respresenta un aspecto fundamental en las restricciones de cruce y adelantamiento.

5.2 Generación del escenario

Una vez comentadas las distintas variables del problema de optimización así como los diferentes parámetros de entrada utilizados para llevar a cabo las simulaciones en cada uno de los diferentes escenarios propuestos, se detallan a continuación las características de los diferentes escenarios. En la Figura 5.1 se muestra el mapa de de marea para un barco con un calado de 7.5 metros, el cual corresponde al barco de mayor calado actualmente transitando en la ría del Guadalquivir para considerar así el peor escenario posible en todas las simulaciones. Conocer este mapa de profundidad es de vital importancia para, tal y como se detalló en secciones anteriores, calcular los distintos posibles caminos de marea factibles para cada una de las distintas embarcaciones.

En la figura 5.2 se muestra un ejemplo de planificación, el cual incluye un total de 8 barcos, 4 navegando aguas arriba y otros 4 navegando aguas abajo. La línea roja indica las trayectorias de los barcos que van aguas arriba y la verde la de los barcos que van aguas abajo. Esta representada de manera que enfrenta la posición existente entre la desembocadura y el puerto, con el tiempo en una escala de 0.1.

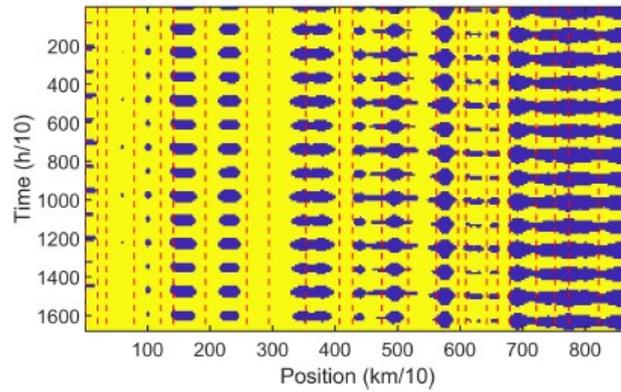


Figura 5.1 Mapa de los puntos espacio-tiempo en los cuales un barco de 7.5 metros de calado puede navegar.

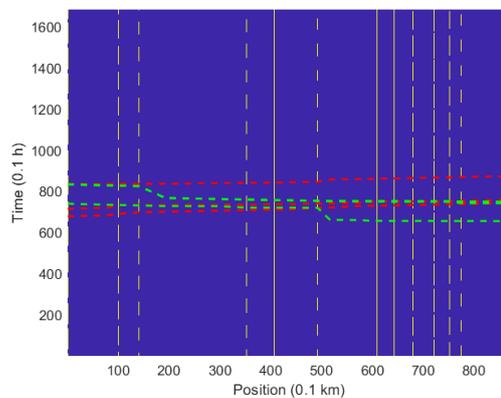


Figura 5.2 Ejemplo de planificación.

Si hacemos zoom en la figura podemos observar como cumple los criterios de admisibilidad dadas por las restricciones de marea. Esto se puede ver claramente en la figura 5.3, donde observamos que en la distancia correspondiente al límite de cada sección, las trayectorias de los barcos cruzan siempre por la franja amarilla, la cual es la que permite la admisibilidad en ese punto a esa determinada hora.

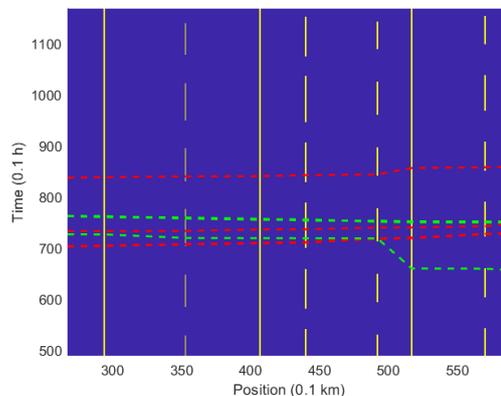


Figura 5.3 Comprobación criterios de admisibilidad en términos de profundidad .

5.3 Necesidad de replanificación

5.3.1 Fundamentos

Como hemos comentado en la introducción de la sección 3, son diversas las cuestiones que se nos presentan a la hora de producirse ciertos eventos inesperados, que alteran el curso de la concepción original que se tenía sobre un determinado plan original. Para justificar la necesidad de llevar a cabo replanificaciones ante la aparición de ciertos eventos inesperados, como retardos o disminución de la velocidad, realizamos a continuación un análisis donde se muestran las consecuencias de no llevar a cabo la replanificación ante cierto incidente y por lo tanto no realizar modificaciones en el plan original dado a las embarcaciones.

Fundamentalmente se tienen en cuenta dos eventos que pueden producir cambios drásticos en la planificación previa, afectando así en gran medida tanto a la seguridad del tránsito en la ría, como al coste general que supone dicho trayecto, debido a la diferencia entre los tiempos de llegada previstos y los finalmente registrados. Los dos eventos fundamentales considerados son:

- **Retrasos en la llegada de los barcos:** cuando una embarcación no se encuentra disponible para comenzar al planificación a la hora estimada debido a un retraso, produce un desajuste en la planificación debido a que al llegar tarde un determinado número de barcos, estos no se pueden adherir al plan original, que concebía una determinada hora de llegada de los mismos en función de la cual se calcularon las diferentes trayectorías para una navegación segura y lo más rápida posible.
- **Sobrecalentamiento del motor:** debido a las condiciones de temperatura a los que se someten las embarcaciones en la ría y debido a las propias limitaciones mecánicas, no todos los barcos pueden ajustarse al plan de una manera perfecta, debido a que un problema de sobrecalentamiento en el motor conlleva una reducción de velocidad, lo cual afecta a los tiempos estipulados de travesía en cada una de las secciones, y por tanto a su admisibilidad con respecto a las limitaciones de profundidad, de cruce y a la optimización de los tiempos de llegada.

Para ver de una manera ejemplificativa el efecto que tienen estos sucesos en la planificación hemos representado dos figuras que ejercen una comparativa. En la Figura 5.4 se representa el plan original sin incidencias. Este plan cuenta con 8 barcos de diferentes tamaños, de los cuales 4 navegan aguas arriba y 4 aguas abajo. Esta planificación está realizada originalmente con el propósito de establecer una serie de rutas óptimas en términos de factibilidad y costes. Sin embargo en la figura 5.5 podemos ver las consecuencias que conlleva el no ejercer una replanificación en el caso de que se produzcan retrasos en las llegadas de las embarcaciones. Justamente en este ejemplo, analizando la posible situación de que se produzca un retraso con una probabilidad del 20%, vemos que se produce un retraso en la salida del barco número 3 que va en dirección a Cádiz (línea granate). Dicha diferencia se puede apreciar en la figura 5.5, donde remarcada por una flecha, se puede ver el desplazamiento de su trayectoria, debido a su retraso, con respecto a la que presenta en la figura 5.4. El valor de dicho retraso es de 89,2.

Como es de esperar este cambio de trayectoria, afecta a la factibilidad del problema si no se lleva a cabo una replanificación del plan original. Concretamente en este ejemplo se producen dos accidentes propiciados por cruces indebidos (marcados en la figura 5.5). Estos cruces son ilegales, ya que en dichos puntos la suma del ancho de los barcos es inferior a la anchura máxima de dicha sección en la que se encuentra el punto de cruce.

Estos cruces ilegales se producen en la sección 14 y 22 respectivamente, en posiciones iguales a 52,55 km y 75,08 km.

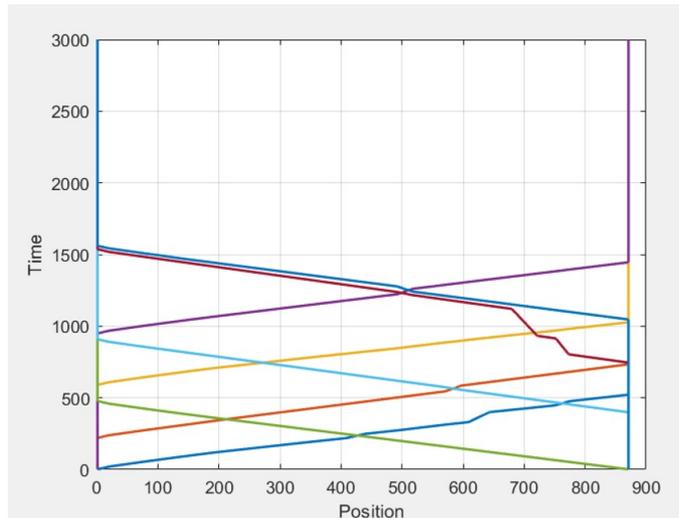


Figura 5.4 Planificación original.

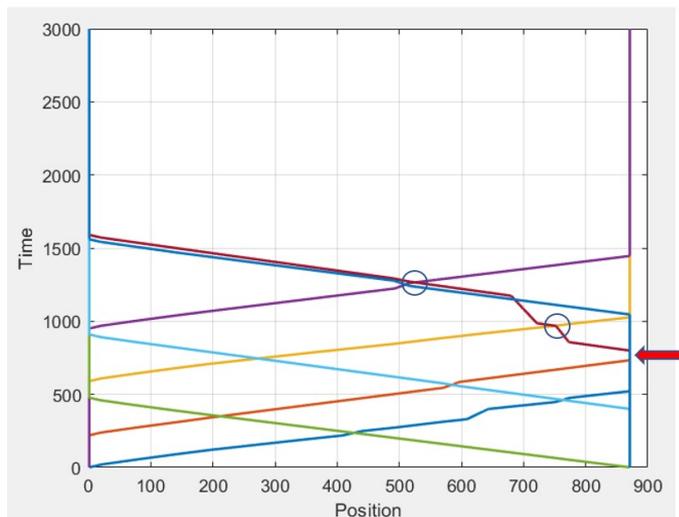


Figura 5.5 Planificación en desajuste debido al retraso.

De una manera análoga, podemos realizar este mismo análisis viendo como afecta la probabilidad de que un determinado motor de un barco se caliente ($p_{warming}$) al desajuste que propicia en el planteamiento elaborado por la planificación original. Dichos barcos al experimentar un sobrecalentamiento se ven forzados a disminuir su velocidad en una proporción igual a la dada por el parámetro $\alpha_{warming}$.

Con un $p_{warming}$ igual al 20% y un $\alpha_{warming}$ igual al 50%, realizamos una simulación donde vemos que se propician dos cruces ilegales en las secciones 18 y 21, concretamente en los puntos iguales a 646,31 km y 738,97 km respectivamente. También se puede apreciar como este cambio en las velocidades afecta en la pendiente descrita en estas trayectorias en el momento en el que se produce el calentamiento del motor. Es lógico deducir que un cambio en la velocidad conlleva un cambio de pendiente en una gráfica en la que se enfrentan el espacio con el tiempo. Estas comparativas quedan representadas en las figuras 5.6 y 5.7, donde los puntos rojos indican los instantes de sobrecalentamiento y las cruces amarillas los accidentes producidos.

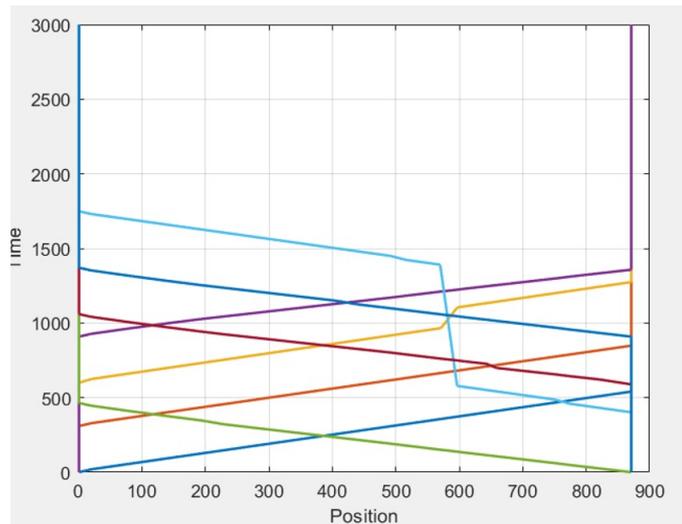


Figura 5.6 Planificación original.

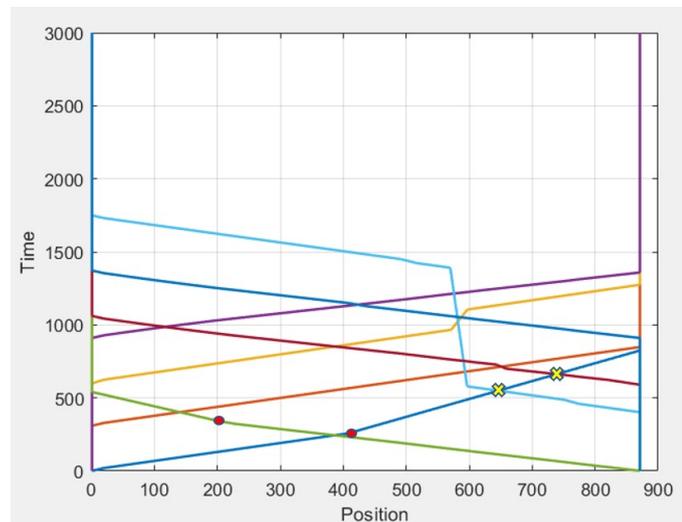


Figura 5.7 Planificación en desajuste debido al sobrecalentamiento.

5.3.2 Influencia de las variables

Una manera interesante de seguir con este análisis es como afectan las variables que hemos tenido en cuenta en las consecuencias que acarrea el no llevar a cabo una replanificación en caso de que se produzcan los imprevistos comentados.

Para ello se han realizado una serie de simulaciones iterativas en las que se han ido cambiando determinados parámetros para ver como influye negativamente la no replanificación, donde se han tomado valores promedio de los resultados. Recalcar que en todos los escenarios recreados en este apartado, trabajamos con $N=8(n_{up}=4, n_{down}=4)$.

Lambda

En una primera instancia, desde un razonamiento puramente teórico, se podría deducir que λ no influye en el número de accidentes, debido a que el hecho de que los barcos lleguen en instantes más separados no implica que estos no se crucen en determinados puntos del río. Para que esto no

se produjese los valores de λ tendrían que ser sumamente grandes, de forma que propicie que las embarcaciones no se crucen en ningún momento de su transcurso por la ría.

Si estos valores de λ no son increíblemente grandes, lo que se puede observar es que no influye en el número de cruces, en todo caso en el lugar en el que se producen.

Por ello, podemos apreciar según los experimentos realizados y que quedan reflejados en la tabla 5.1, que esta no influye en el número de accidentes que se producen.

Tabla 5.1 Influencia de lambda en el número de accidentes.

λ	5	10	20	40
Número accidentes	5.48	5.44	5.24	5.48

Probabilidad de retraso

De manera análoga probamos como afecta la probabilidad de retraso en algunos de los indicadores más importantes, donde los distintos experimentos que se han realizado en este apartado se han establecidos una probabilidad de calentamiento nula y λ fija de valor igual a 30, para ver como afecta de una manera más directa a las variables que queremos estudiar.

Tabla 5.2 Influencia de la probabilidad de retraso.

Probabilidad de retraso	10%	20%	30%	40%	50%	60%
Número accidentes	0.95	2.3	2.65	2.95	3.35	6.7
Diferencia tiempos llegada	0.95	122.75	184.65	241.3	297.4	396

Donde podemos apreciar que conforme mayor es la probabilidad de que se produzca un retraso, mayor número de accidentes se produce, siguiendo una exponencial.

En la Figura 5.8 se representa esta relación de manera gráfica.

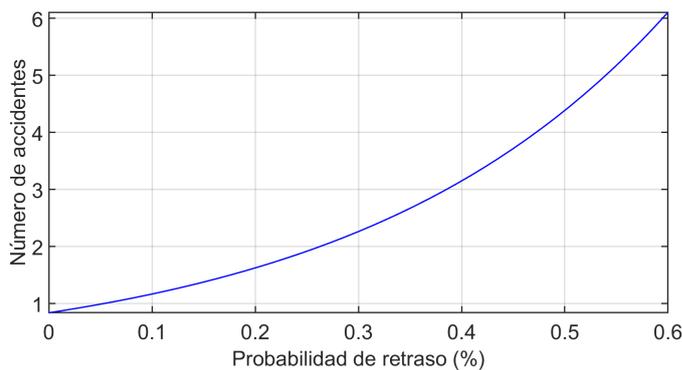


Figura 5.8 Relación entre la probabilidad de retraso y el número de accidentes.

Por otro lado se concluye que la diferencia de los tiempos de llegada entre el plan original y los que poseen una determinada probabilidad de retardo aumenta con esta probabilidad de una manera lineal, figura 5.9

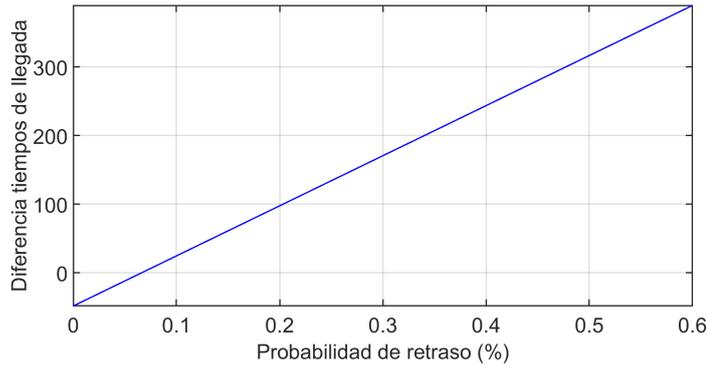


Figura 5.9 Relación entre la probabilidad de retraso y ATD.

Probabilidad de calentamiento

Este estudio es similar al anterior, en el cual en este caso hemos establecido una probabilidad de retraso nula, λ igual a 30 y un $\alpha_{warming}$ igual al 50%

Tabla 5.3 Influencia de la probabilidad de calentamiento.

Probabilidad de calentamiento	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%
Número accidentes	0.8	2.6	2.7	3.3	4.25	4.39	5.6	6
Diferencia tiempos llegada	62.1	236.15	270.85	423	546.5	546.5	679.95	679.95

Donde podemos apreciar que conforme mayor es la probabilidad de que se produzca un sobrecalentamiento, mayor número de accidentes se produce, siguiendo una exponencial.

En la Figura 5.10 se representa esta relación de manera gráfica.

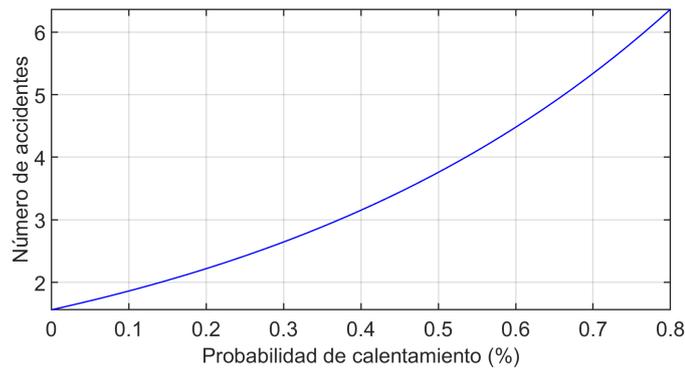


Figura 5.10 Relación entre el número de accidentes y la probabilidad de calentamiento.

Por otro lado se concluye que la diferencia de los tiempos de llegada entre el plan original y los que poseen una determinada probabilidad de sobrecalentamiento aumenta con esta probabilidad de una manera lineal, figura 5.11

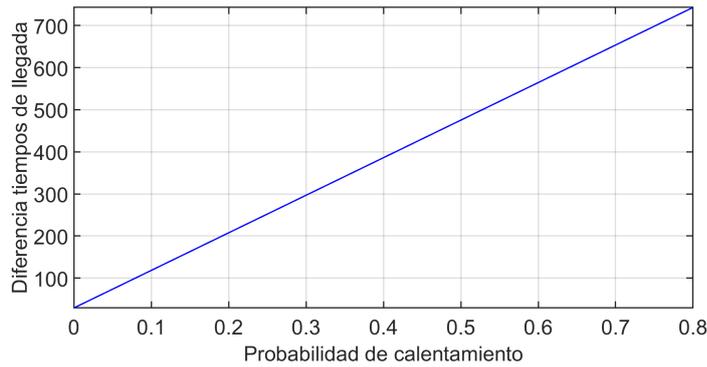


Figura 5.11 Relación entre la probabilidad de calentamiento y ATD.

5.4 Replanificación convencional

5.4.1 Introducción

Una vez vista la necesidad de la replanificación para un transcurso de las embarcaciones de manera factible y óptima, queda ver cuales son las distintas estrategias de replanificación seguidas.

La replanificación convencional comunmente usada en la gestión del tráfico portuario, se fundamenta en fijar las rutas de los barcos que llegan a su hora y replanificar las de aquellos que llegan tarde, los cuales informan previamente de su retraso al puerto, indicando la cuantía del retaso con la que van a llegar.

Analizando previamente desde un punto de vista puramente teórico, cabe pensar que conforme mayor es el número de trayectorias que se fijan, mayor es el número de restricciones que se le impondrían al solver correspondiente, lo que acarrearía una mayor dificultad a la hora de encontrar soluciones factibles.

Cabe recalcar que la estrategia y resultados de la replanificación es altamente dependiente del estado inicial, ya que este determina el estado de la ventana de marea en la que se sitúa, la cual puede ser beneficiosa o desfavorable para que las embarcaciones en cuestión realicen su trayecto.

5.4.2 Análisis de factibilidad

Para mostrar en términos numéricos como es de factible la replanificación manual, se ha realizado mediante un código desarrollado en *Matlab* una serie de iteraciones donde variando el número de barcos que llegan con retraso y la cuantía de los retardos, podemos observar como varía la factibilidad del problema.

Dentro de este campo podemos decidir si queremos que las embarcaciones entren en la ventana de marea que tenían definido previamente, es decir, antes de informar de su retardo, o bien asignándole una nueva la cual tenga en cuenta el retardo de llegada de la embarcación.

A la hora de realizar las simulaciones y tener esto en cuenta, se varía el valor del parámetro *Dead_Line*, el cual asume el valor del retardo si se asigna una nueva ventana de marea.

Como podemos observar en la tabla 5.4 y 5.5, existe una gran diferencia en los valores de los porcentajes factibles.

La base de la replanificación convencional se fundamenta en aspectos de conformidad del cliente, puesto que hacer variar las rutas de los barcos que ya se encuentran en navegación dentro de la ría debido a retrasos de otras embarcaciones ajenas, supone una molestia a aquellas embarcaciones que han llegado a su hora correspondiente. Por ende aquellas que llegan tarde son las que sufren las consecuencias de una replanificación que puede conllevar el tener un gran coste de espera para poder acceder a una ventana de marea favorable.

Tabla 5.4 Porcentaje de factibilidad sin modificación en el Dead Line.

		Delay			
		5	10	20	40
Número de barcos con retraso	1	100 %	100 %	100 %	100 %
	2	100 %	100 %	98 %	98 %
	3	100 %	90 %	90 %	66 %
	4	88 %	80 %	78 %	50 %

Tabla 5.5 Porcentaje de factibilidad con modificación en el Dead Line.

		Delay			
		5	10	20	40
Número de barcos con retraso	1	94 %	98 %	92 %	100 %
	2	100 %	100 %	100 %	100 %
	3	96 %	96 %	98 %	100 %
	4	98 %	100 %	96 %	94 %

5.4.3 Relación entre los tiempos de salida y el coste

La relación existente entre los tiempos de salida y la función de coste es algo compleja, ya que son interdependientes entre sí. A pesar de esto, hemos considerado hacer una serie de simulaciones que reflejen la relación existente entre ambos intentando simular el comportamiento que sigue a día de hoy un puerto convencional en términos de replanificación. Para ello hemos tenido en cuenta un escenario en el que se encuentran navegando 4 barcos, dos aguas arriba y dos aguas abajo, donde los retardos que se producían en los barcos eran aleatorios, comprendidos entre valores de 5 a 40. De una misma forma las lambdas comprendían valores de 5 a 20.

Tabla 5.6 Coste en función del número de barcos con retraso y los tiempos de salida.

		T_readys							
		100	250	400	450	500	550	600	650
Número de barcos con retraso	1	312.65	471.71	477.71	307.39	471.33	394.41	357.34	476.61
	2	334.14	460.38	477.45	318.58	455.06	386.07	354.45	460.08
	3	351	477.01	459.74	314.8	478.75	388.67	359.27	457.52
	4	346.04	475.68	451.19	301	476.66	378.34	352.56	443.93

Cada una de estas celdas representa el coste promedio de 30 simulaciones, las cuales cuentan según su fila, con el retraso de un determinado número de barcos, y según su columna, la hora aproximada en la cual el primer barco esta disponible para salir.

Un aspecto importante que podemos observar, es que el retraso puede ser favorable o desfavorable, en el caso de que lo permita factibilidad, en función de la hora de salida. Esto es debido a que un determinado barco con un determinado retraso, puede llegar a una nueva hora que le resulte más favorable que la que tenía anteriormente, debido a que puede contar con condiciones de marea mejores para navegar, o en defecto, peores.

Es importante recalcar que en estas simulaciones solo se han tomado el promedio de costes de aquellos escenarios que resultaban factibles.

Una buena manera de observar la relación existente entre el coste y los tiempos de salida, es la realización de una serie de simulaciones donde entra en juego únicamente un barco donde no experimenta ningún tipo de retraso. Estos experimentos se han realizado tanto para un barco que

navega aguas arriba como para uno que navega aguas abajo. En estas simulaciones se han ido cambiando los tiempos de salida de la embarcación ($t_{departure}$) comprendiendo 25 horas, que es lo que suele ocupar una ventana de marea completa. Podemos ver así la influencia comentada y como afecta significativamente la periodicidad de la marea de tipo semidiurno en los costes del trayecto, los cuales se encuentran condicionados por la minimización del tiempo que conlleva el trayecto. Los puntos mínimos de la gráfica muestran las horas de salida en las cuales los barcos experimentan un menor coste, esto es debido a que debido a la hora han obtenido una ventana de marea mas favorable que le permite desplazarse mas rapidamente hacia su destino. Los casos del barco que navega aguas arriba y el que navega aguas abajo quedan representadas respectivamente en las figuras 5.12 y 5.13.

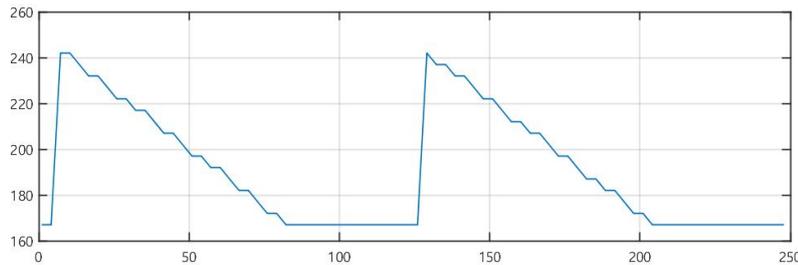


Figura 5.12 Tiempos de salida frente a costes de un barco que navega aguas arriba.

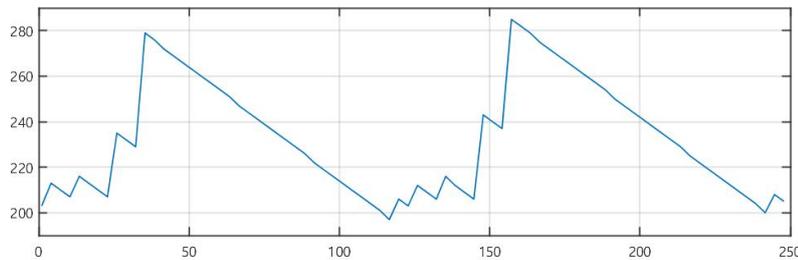


Figura 5.13 Tiempos de salida frente a costes de un barco que navega aguas abajo.

5.5 Replanificación completa fuera de línea

En una visión contrapuesta a la que ofrece la replanificación convencional, estudiamos como afectaría el hecho de replanificar todos los barcos una vez se recibe la información de que uno u varios llegan tarde.

Esto conlleva el no fijar la trayectoria de los barcos que han llegado a su hora, lo que se traduce a una mayor factibilidad puesto que son menores las restricciones que se le imponen al algoritmo.

Esta es una filosofía que como hemos comentado anteriormente no liga con la replanificación convencional, puesto que aunque sea mejor en lo que a términos de factibilidad se refiere, conlleva el cambiar el plan de los barcos que si han llegado a su hora, y que por tanto genera una disconformidad en los clientes que acuden en sus embarcaciones al puerto.

En las tablas 5.7 y 5.8, se han realizado unos experimentos análogos a los mostrados en el apartado 5.3.2..La diferencia radica en la restricciones de fijación de rutas, las cuales en este caso no han sido tomadas en cuenta. Al ser un algoritmo de replanificación completa, todos los barcos lleguen tarde o no son replanificados. Observando estas tablas, fundamentalmente la 5.7, observamos que hay un mayor índice de factibilidad que la correspondiente al apartado 5.3.2. Esto se debe a que, como ya hemos comentado, al contar el solver con menos restricciones, este tiene mayor facilidad para encontrar soluciones factibles.

Tabla 5.7 Porcentaje de factibilidad sin modificación en el Dead Line.

		Delay			
		5	10	20	40
Número de barcos con retraso	1	100 %	100 %	100 %	100 %
	2	100 %	100 %	98 %	96 %
	3	94 %	92 %	82 %	66 %
	4	92 %	90 %	70 %	78 %

Tabla 5.8 Porcentaje de factibilidad con modificación en el Dead Line.

		Delay			
		5	10	20	40
Número de barcos con retraso	1	98 %	96 %	100 %	98 %
	2	98 %	98 %	96 %	100 %
	3	100 %	96 %	94 %	98 %
	4	98 %	100 %	96 %	94 %

5.6 Replanificación en tiempo real

Frente a la propuesta de replanificación descrita anteriormente y mediante la cual la replanificación de los barcos se produce fuera de línea una vez que se notifica la llegada con retardo por uno o varios de los barcos involucrados en la planificación original, afectando de esta manera el buen desarrollo de la operación global, en este apartado se da un paso más allá y se propone la replanificación en tiempo real en caso de que se detecte un evento inesperado, como puede ser el retardo de alguno de los barcos o la reducción de la velocidad debido a un calentamiento de motor. Para ello, se propone un arquitectura de detección de fallos y replanificación que constantemente compara la posición actual de cada una de las embarcaciones de acuerdo con su señal GPS, con la posición esperada según el plan original. Para ello, en este trabajo suponemos que todos y cada uno de los barcos involucrados en la planificación cuenta con un sistema de identificación automática (AIS) que constantemente emite la posición del barco, y el cual según la normativa marítima internacional ha de estar integrado en todas y cada una de las embarcaciones de más de 300 toneladas de peso total así como en todas y cada una de las embarcaciones de pasajeros indistintamente de su tonelaje [8].

Supóngase que $x_i(t)$ es la posición actual del barco i emitida por la señal GPS en el instante t . Supóngase además que $x_i^\dagger(t)$ es la posición del barco esperada según la simulación mediante integración del modelo del barco de acuerdo a la planificación original. En caso de que en cualquier instante de operación de las embarcaciones en tiempo real se detecte que el barco se ha desviado de la posición esperada más de un determinado valor umbral ψ , es decir, $|x_i(t) - x_i^\dagger(t)| \geq \psi$, se genera una señal de alarma que indica que un fallo de operación se ha producido y que es necesario llevar a cabo una replanificación global del plan de todas las embarcaciones en aras de garantizar la seguridad de la operación. En este trabajo se ha optado por llevar a cabo una replanificación global a través de la cual se deja libres como variables de decisión los instantes en los cuales todas y cada una de las diferentes embarcaciones atraviesa cada uno de los tramos de río restantes a partir de la posición actual en la cual se encuentran localizadas, mientras que en el nuevo problema de replanificación a resolver es necesario fijar el valor de aquellas variables de tiempo correspondientes a cada uno de los tramos de la ría que el barco ya ha recorrido. Supóngase que el momento de detección del fallo la embarcación i ha atravesado los P primeros puntos de separación de la ría. En ese caso, la siguiente restricción es añadida al problema de optimización

$$t_{i,p} = t_{i,p}^* \quad \forall i = 1, \dots, P, \quad (5.1)$$

donde $t_{i,p}^*$ es el valor del instante de cruce del barco i por la frontera p según lo dictado por el plan original. Además de esta restricción, para llevar a cabo la resolución del problema original, será necesario actualizar para cada barco i el tiempo en el que este se encuentra listo para ser planificado en caso de que se haya producido un retardo y aún no haya llegado hasta alguno de los extremos de la ría, y será necesario actualizar la restricción de velocidad máxima de una embarcación en caso de que ésta haya sufrido una avería por calentamiento.

Una vez que se ha resuelto el nuevo problema de replanificación, y se ha obtenido mediante simulación una nueva trayectoria esperada de todos y cada uno de los barcos, las nuevas consignas de velocidad son transmitidas a los prácticos de cada uno de los barcos para que la trayectoria de los barcos se ajuste al nuevo plan. En el presente trabajo se ha supuesto que la velocidad aplicada por el práctico en cada momento es aquella velocidad que permite conectar dos puntos espacio-temporales del plan mediante un segmento de línea recta. Una vez que finaliza la replanificación y puesta en marcha del nuevo plan, el sistema vuelve a monitorizar la trayectoria de todos y cada uno de los barcos para detectar cualquier posible nuevo evento inesperado que conduzca a una nueva desviación de la trayectoria, en cuyo caso una nueva replanificación sería llevada a cabo. Esta metodología de detección de eventos y replanificación se muestra de manera ilustrativa en el diagrama de la Figura 5.14.

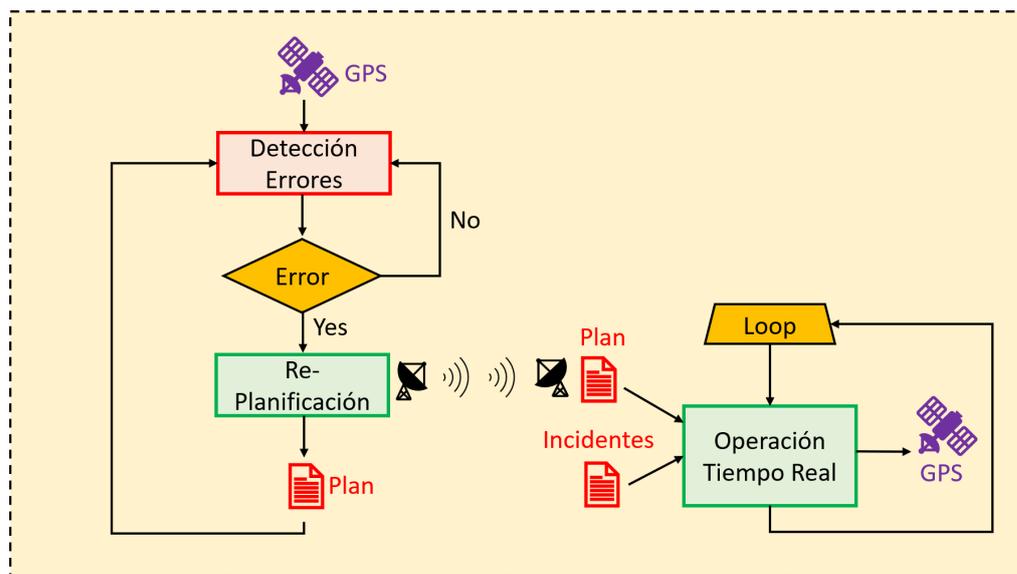


Figura 5.14 Replanificación en tiempo real..

En la Figure 5.15 se muestra un caso de replanificación para un escenario con un total de 4 embarcaciones viajando en cada sentido, un valor de $\lambda = 5$, y un error por calentamiento en el instante 1 hora y 15 minutos, y donde las trayectorias en rojo representan los caminos seguidos por los barcos según el plan original y las trayectorias en verde los caminos seguidos por los barcos tras la replanificación al detectar el error.

Tal y como se puede observar en la Figure 5.15 las trayectorias de los barcos son idénticas hasta el punto temporal en el que se produce el calentamiento del motor, momento en el cual las trayectorias con y sin llevar a cabo la replanificación ante el incidente divergen.

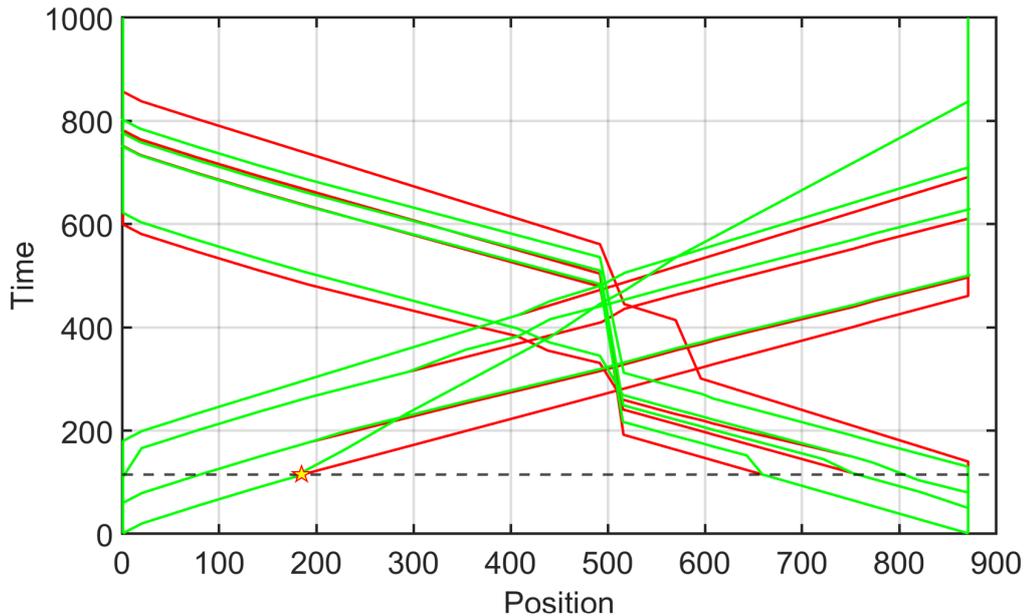


Figura 5.15 Ejemplo de replanificación en tiempo real..

5.7 Conclusiones

La principales conclusiones a las cuales se ha llegado tras la elaboración del presente trabajo son:

1. La planificación de embarcaciones en canales naturales sujetos a restricciones operacionales y diversos fenómenos naturales es un problema difícil de resolver.
2. Se ha propuesto un algoritmo de planificación basado en la resolución de un problema de optimización donde las variables de decisión son los instantes en los que cada una de las embarcaciones cruzar una serie de fronteras en las que el canal se divide.
3. En dicho problema de optimización, además de tener en cuenta los posibles cruces y adelantamientos entre barcos, es necesario considerar el efecto dinámico de la marea así como la batimetría del río, razón por la cual en el presente trabajo se utiliza un método para la obtención de rutas de navegación seguras.
4. La aparición de eventos insperados no contemplados en la planificación original tiene un enorme efecto no sólo en el desempeño de la operación, sino que pone en riesgo la seguridad de ésta con la aparición de posibles choques entre embarcaciones.
5. Se demuestra que, frente a una replanificación convencional donde sólo la trayectoria del barco afectado por un determinado evento inesperado es replanificada, la realización de una replanificación global de las trayectorias de todos los barcos mejora la factibilidad del problema.
6. Se ha propuesto una arquitectura de detección de fallos y replanificación en tiempo real que es capaz de detectar y actuar de manera automática ante un determinado evento imprevisto, como puede la reducción por calentamiento de motor de la velocidad de una determinada embarcación.
- 7.

Índice de Figuras

2.1	Imágen vía Satélite de la ría del Guadalquivir	4
2.2	Esclusa Puerta del Mar	4
2.3	Sección 1	5
2.4	Sección 2	5
2.5	Flujo Información Ferroportuaria	9
2.6	Tráfico marítimo anual en términos de productos	11
3.1	Perfil Batimétrico de la ría del Guadalquivir.	14
3.2	Desnivel en mareas de tipo semidiurno.[2]	15
3.3	Niveles de la marea	16
4.1	Fases del tránsito.Imágen sacada de [6]	18
4.2	Secciones limitadas temporalmente por distancia de seguridad.Imágen sacada de [6]	19
4.3	Mapa del estuario de Yangtze.Sacada de [5]	19
4.4	Procedimiento de paso.Sacada de [5]	20
4.5	Diagrama de decisión del estuario de Yangtze.Realizada traduciendola de [5]	20
4.6	Descripción esquemática de los modulos operantes.Imagen extraida de [7]	22
4.7	Componentes de la estimación de la profundidad del agua.Extraida de [7]	23
4.8	Inicialización del código.[7]	24
4.9	Resumen del algoritmo utilizado.[7]	24
4.10	Ejemplo combinación ventanas temporales.Imagen extraida de [7]	25
4.11	Ejemplo de funcionamiento de las variables $c_{i,j,p}$	27
4.12	Representación del procedimiento seguido para la instauración de tubos seguros y admisibles	29
4.13	Parámetros del río Guadalquivir	30
4.14	Algoritmo de construcción de tubos de barcos navegando aguas arriba	30
4.15	Caso paralelogramo P_{μ}^r	31
4.16	Segundo caso paralelogramo P_{μ}^r	31
5.1	Mapa de los puntos espacio-tiempo en los cuales un barco de 7.5 metros de calado puede navegar	35
5.2	Ejemplo de planificación	35
5.3	Comprobación criterios de admisibilidad en términos de profundidad	35
5.4	Planificación original	37
5.5	Planificación en desajuste debido al retraso	37
5.6	Planificación original	38
5.7	Planificación en desajuste debido al sobrecalentamiento	38
5.8	Relación entre la probabilidad de retraso y el número de accidentes	39

5.9	Relación entre la probabilidad de retraso y ATD	40
5.10	Relación entre el número de accidentes y la probabilidad de calentamiento	40
5.11	Relación entre la probabilidad de calentamiento y ATD	41
5.12	Tiempos de salida frente a costes de un barco que navega aguas arriba	43
5.13	Tiempos de salida frente a costes de un barco que navega aguas abajo	43
5.14	Replanificación en tiempo real.	45
5.15	Ejemplo de replanificación en tiempo real.	46

Índice de Tablas

2.1	Terminales principales	5
2.2	Primera instalación	7
2.3	Segunda instalación	7
2.4	Tercera instalación	7
2.5	Cuarta instalación	8
5.1	Influencia de lambda en el número de accidentes	39
5.2	Influencia de la probabilidad de retraso	39
5.3	Influencia de la probabilidad de calentamiento	40
5.4	Porcentaje de factibilidad sin modificación en el Dead Line	42
5.5	Porcentaje de factibilidad con modificación en el Dead Line	42
5.6	Coste en función del número de barcos con retraso y los tiempos de salida	42
5.7	Porcentaje de factibilidad sin modificación en el Dead Line	44
5.8	Porcentaje de factibilidad con modificación en el Dead Line	44

Bibliografía

- [1] *Web del Puerto de Sevilla*, <https://www.puertodesevilla.com/>, Accessed: 2022-06-29.
- [2] M Cadena, *Nivel del mar y régimen de marea en las estaciones mareográficas de Colombia*, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Subdirección de Meteorología. Bogotá, Colombia. Recuperado el 6 (2012).
- [3] Silvia Costa, JM Gutiérrez Mas, and JA Morales, *Establecimiento del régimen de flujo en el estuario del Guadalquivir, mediante el análisis de formas de fondo con sonda multihaz*, *Revista de la Sociedad Geológica de España* **22** (2009), no. 1-2, 23–42.
- [4] I Donázar-Aramendía, JE Sánchez-Moyano, I García-Asencio, JM Miró, C Megina, and JC García-Gómez, *Impact of dredged-material disposal on soft-bottom communities in a recurrent marine dumping area near to Guadalquivir estuary, Spain*, *Marine environmental research* **139** (2018), 64–78.
- [5] Eduardo Lalla-Ruiz, Xiaoning Shi, and Stefan Voß, *The waterway ship scheduling problem*, *Transportation Research Part D: Transport and Environment* **60** (2018), 191–209.
- [6] Dongdong Liu, Guoyou Shi, and Zhen Kang, *Fuzzy scheduling problem of vessels in one-way waterway*, *Journal of Marine Science and Engineering* **9** (2021), no. 10, 1064.
- [7] Jesús Muñozuri, Elena Barbadilla, Alejandro Escudero-Santana, and Luis Onieva, *Planning navigation in inland waterways with tidal depth restrictions*, *The Journal of Navigation* **71** (2018), no. 3, 547–564.
- [8] Kostas Patrourmpas, Elias Alevizos, Alexander Artikis, Marios Vodas, Nikos Pelekis, and Yannis Theodoridis, *Online event recognition from moving vessel trajectories*, *GeoInformatica* **21** (2017), no. 2, 389–427.
- [9] Enrique Mesa Pérez, *El dragado del río Guadalquivir: Un proyecto medioambientalmente inviable*, *MoleQla: revista de Ciencias de la Universidad Pablo de Olavide* (2015), no. 19, 9.
- [10] R Siles-Ajamil, M Díez-Minguito, and MÁ Losada, *Tide propagation and salinity distribution response to changes in water depth and channel network in the Guadalquivir river estuary: an exploratory model approach*, *Ocean & Coastal Management* **174** (2019), 92–107.

