



## Trabajo de Fin de Grado

---

# Diseño e implementación de un servicio web para el hospedaje de algoritmos de optimización para la gestión del instrumento EMIR

*Design and implementation of a web service for hosting optimization algorithms for the management of the EMIR instrument*

Kilian González Rodríguez

---

La Laguna, 11 de julio de 2024

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6610232 Código de verificación: QvciauC/y

Firmado por: KILIAN GONZÁLEZ RODRÍGUEZ  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha 11/07/2024 14:49:53

Jorge Riera Ledesma  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

11/07/2024 14:54:31

D. **Jorge Riera Ledesma**, profesor Titular de la Universidad, adscrito al Departamento de Ingeniería Informática de la Universidad de La Laguna, como tutor

D. **Manuel Alejandro Bacallado López**, profesor Contratado Laboral de Interinidad de la Universidad, adscrito al Departamento de Ingeniería Informática de la Universidad de La Laguna, como cotutor

**C E R T I F I C A ( N )**

Que la presente memoria titulada:

*"Diseño e implementación de un servicio web para el hospedaje de algoritmos de optimización para la gestión del instrumento EMIR"*

ha sido realizada bajo su dirección por D. **Kilian González Rodríguez**.

Y para que así conste, en cumplimiento de la legislación vigente y a los efectos oportunos firman la presente en La Laguna a 11 de julio de 2024

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6610232 Código de verificación: QvciuC/y

Firmado por: KILIAN GONZÁLEZ RODRÍGUEZ  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha 11/07/2024 14:49:53

Jorge Riera Ledesma  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

11/07/2024 14:54:31

## Agradecimientos

A mis padres por estar siempre ahí a mi lado apoyándome.

A mis amigos que me animaron a continuar.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 6610232      Código de verificación: QvciuC/y

Firmado por: KILIAN GONZÁLEZ RODRÍGUEZ  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha 11/07/2024 14:49:53

Jorge Riera Ledesma  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

11/07/2024 14:54:31

## Licencia



© Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 6610232      Código de verificación: QvcIUc/y

Firmado por: KILIAN GONZÁLEZ RODRÍGUEZ  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha 11/07/2024 14:49:53

Jorge Riera Ledesma  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

11/07/2024 14:54:31

### Resumen

*Este Trabajo Fin de Grado aborda un problema de optimización en la gestión de un espectrógrafo multiobjeto en un telescopio. El instrumento en cuestión posee una serie de bandas con barras deslizantes cuya sincronización permite la observación simultánea de varios objetos.*

*Debido a la alta demanda del instrumento y las limitaciones de tiempo, el proyecto en cuestión propone el uso de un método para la selección, proporcionando una secuencia de configuraciones de las barras de cada banda para maximizar el número de objetos observados.*

*Con el fin de que dicho método de resolución esté disponible a los gestores del instrumento en cuestión, este trabajo culmina con un servicio web que pone a disposición de los usuarios el motor de resolución sobre una máquina virtual.*

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6610232 Código de verificación: QvcIUc/y

Firmado por: KILIAN GONZÁLEZ RODRÍGUEZ  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha 11/07/2024 14:49:53

Jorge Riera Ledesma  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

11/07/2024 14:54:31

### Abstract

*This Bachelor's Thesis addresses an optimization problem in the management of a multi-object spectrograph on a telescope. The instrument in question has a series of bands with sliding bars whose synchronization allows the simultaneous observation of several objects.*

*Due to the high demand for the instrument and time constraints, this project proposes the use of a method for selection, providing a sequence of configurations for the bars of each band to maximize the number of observed objects.*

*To make this resolution method available to the instrument's managers, this work concludes with a web service that provides users with the resolution engine on a virtual machine.*

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6610232 Código de verificación: QvciauC/y

Firmado por: KILIAN GONZÁLEZ RODRÍGUEZ  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha 11/07/2024 14:49:53

Jorge Riera Ledesma  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

11/07/2024 14:54:31

# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Descripción . . . . .	1
1.2. Objetivos . . . . .	2
1.3. Motivaciones . . . . .	2
1.4. Tecnologías usadas . . . . .	3
1.4.1. Lenguajes de programación . . . . .	3
1.4.2. Frameworks y librerías . . . . .	4
1.4.3. Bases de datos . . . . .	4
1.4.4. Herramientas de control de versiones . . . . .	4
1.4.5. Otras herramientas . . . . .	4
<b>2. Antecedentes y estado del arte</b>	<b>5</b>
<b>3. Explicación del problema</b>	<b>7</b>
3.1. El problema . . . . .	8
3.2. Los parámetros de entrada . . . . .	9
3.3. Caracterización de las soluciones factibles . . . . .	10
3.4. Un caso de uso . . . . .	10
3.5. El modelo . . . . .	12
<b>4. Prototipo Web</b>	<b>15</b>
4.1. Aplicación . . . . .	15
4.1.1. Introducción . . . . .	15
4.1.2. Objetivos del prototipo . . . . .	15
4.1.3. Funcionalidades . . . . .	15
4.2. Resultados . . . . .	18
<b>5. Conclusiones y líneas futuras</b>	<b>20</b>
<b>6. Conclusions and future works</b>	<b>22</b>
<b>7. Presupuesto</b>	<b>24</b>
7.1. Costes de recursos humanos . . . . .	24
7.2. Costes de recursos materiales . . . . .	24
7.3. Coste total . . . . .	25
7.4. Coste de mantenimiento . . . . .	25
<b>8. Anexos</b>	<b>26</b>

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6610232 Código de verificación: QvciuC/y

Firmado por: KILIAN GONZÁLEZ RODRÍGUEZ  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha 11/07/2024 14:49:53

Jorge Riera Ledesma  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

11/07/2024 14:54:31

## Índice de Figuras

1.1. Fotografías de la CSU con diferentes configuraciones. . . . .	2
3.1. Detalles sobre bandas, rendijas y zona muerta. . . . .	8
3.2. Ejemplo con cinco objetos y tres bandas . . . . .	11
3.3. Grafo de transición para el ejemplo de la Figura 3.2 . . . . .	11
3.4. Camino elemental para el ejemplo de la Figura 3.2 . . . . .	12
3.5. Diagrama asociado a una solución factible del ejemplo de la Figura 3.2 . . . .	12
4.1. Interfaz del Inicio . . . . .	16
4.2. Interfaz de añadir instancias . . . . .	17
4.3. Interfaz de gestión de instancias . . . . .	17
4.4. Diagrama de la base de datos . . . . .	18
8.1. Ejemplo de aviso una vez creada una instancia . . . . .	26
8.2. Ejemplo de creación de una instancia mediante el uso de un fichero . . . . .	26
8.3. Ejemplo de eliminación de una instancia . . . . .	27

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6610232 Código de verificación: QvciuC/y

Firmado por: KILIAN GONZÁLEZ RODRÍGUEZ  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha 11/07/2024 14:49:53

Jorge Riera Ledesma  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

11/07/2024 14:54:31



# Índice de Tablas

4.1. Resultados del modelo . . . . . 19

7.1. Generated by Spread-LaTeX . . . . . 25

7.2. Coste de recursos materiales . . . . . 25

7.3. Coste de mantenimiento . . . . . 25

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a>	
Identificador del documento: 6610232	Código de verificación: QvciuC/y
Firmado por: KILIAN GONZÁLEZ RODRÍGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 11/07/2024 14:49:53
Jorge Riera Ledesma UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	11/07/2024 14:54:31

## Capítulo 1

### Introducción

#### 1.1. Descripción

El Gran Telescopio Canarias, también conocido como GTC, es en estos momentos uno de los telescopios ópticos más grandes del mundo y se enmarca dentro de las Infraestructuras Científicas y Técnicas Singulares de España. Este telescopio se ubica en el Observatorio del Roque de los Muchachos, en la isla canaria de La Palma. Recibe financiación tanto del Gobierno Autónomo de Canarias como del Gobierno de España, Fondos Europeos, y también de socios internacionales, como son el Instituto de Astronomía de la Universidad Nacional Autónoma de México y la Universidad de Florida, entre otros. Un rasgo distintivo de esta infraestructura científica es su habilidad para ofrecer datos punteros mediante la utilización de nuevos instrumentos.

Entre los instrumentos más recientes que se han incorporado al GTC destaca EMIR, que está en funcionamiento desde el año 2017. Se trata de una cámara-espectrógrafo de infrarrojo cercano de gran campo de visión, capaz de observar objetos en un campo espectral de  $4 \times 6,64$  minutos de arco al cuadrado. Una de las particularidades más llamativas de EMIR es la inclusión de una unidad robótica criogénica que facilita la configuración remota de un patrón de múltiples rendijas en su campo de visión, donde el GTC proyecta la imagen del cielo. Dicho dispositivo se conoce como CSU (véase Figura 1.1) y está formado por 55 pares de barras deslizantes enfrentadas que pueden desplazarse en una única dirección para formar una rendija. De esta manera, el campo de visión se segmenta en 55 bandas, cada una de ellas asociada a dos barras retráctiles opuestas de una altura de  $h$  segundos de arco. Este valor,  $h$ , está predefinido por el dispositivo. El ancho de la rendija, generada por un par de barras, es seleccionable por el astrónomo en función de las condiciones observacionales y la resolución espectral que se necesite.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6610232 Código de verificación: QvciuC/y

Firmado por: KILIAN GONZÁLEZ RODRÍGUEZ  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha 11/07/2024 14:49:53

Jorge Riera Ledesma  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

11/07/2024 14:54:31

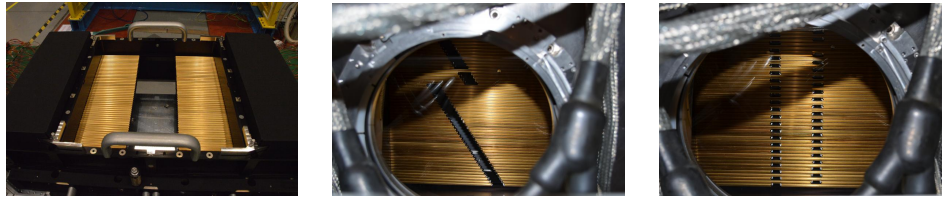


Figura 1.1: Fotografías de la CSU con diferentes configuraciones.

## 1.2. Objetivos

El objetivo que presenta la realización de este proyecto es el de permitir que el método de resolución esté disponible para los gestores del instrumento en cuestión. Por ende, este trabajo culmina con un servicio web que pone a disposición de los usuarios el motor de resolución sobre una máquina virtual.

Este servicio deberá permitir añadir y usar instancias de problemas realizadas por el gestor, las cuales deberán ser verificadas previamente a su uso. Una vez exista una instancia, esta podrá ser enviada al modelo para su resolución, mostrando luego un fichero en el cual se encuentra diversa información acerca de cómo se ha llevado a cabo. Por último, el usuario podrá acceder y gestionar las instancias de problemas ya creadas, así como la información de los resultados.

Cabe destacar que se ha de priorizar el crear una experiencia de usuario positiva y eficiente, desarrollando una interfaz clara y sencilla, permitiendo así su uso de manera intuitiva. Así pues, pese a que está pensado para ser usado en el ordenador principalmente, se debe tener en mente que la interfaz debe adaptarse al tamaño de la pantalla.

## 1.3. Motivaciones

Los astrónomos que utilizan este espectrógrafo proponen una lista de objetos para observar. Dado que el Gran Telescopio de Canarias recibe un gran número de solicitudes debido a su capacidad y precisión, el instrumento está muy demandado. Esta alta demanda impone al gestor del telescopio la necesidad de aplicar una limitación de tiempo muy restrictiva para los trabajos de investigación, lo que obliga a seleccionar únicamente un subconjunto de estos objetos.

La optimización es, por lo tanto, clave para maximizar el aprovechamiento

del telescopio. Este trabajo propone un método de resolución para esta selección y proporciona una secuencia de configuraciones para las barras en cada banda de manera tal que se maximice el número de objetos seleccionados para su estudio, sujeto además a ciertas cuestiones de sincronización y a la limitación de tiempo.

Dejando clara la importancia de la optimización del instrumento, hay que considerar también la relevancia no solo del modelo en sí, sino de la facilidad de uso del mismo. Un modelo eficiente es fundamental, pero su impacto real depende de su accesibilidad y facilidad de implementación por parte de los gestores del telescopio. Por ello, el uso de una herramienta como un servicio web es clave para facilitar su uso. Este servicio web proporciona una interfaz amigable y accesible, permitiendo a los gestores del instrumento aplicar el modelo de optimización de manera eficiente y sin complicaciones técnicas adicionales.

## 1.4. Tecnologías usadas

En el desarrollo de este proyecto, se ha hecho uso de diversas tecnologías para garantizar que el prototipo web sea robusto, eficiente y fácil de usar. La correcta selección y utilización de estas herramientas ha sido fundamental para cumplir con los objetivos establecidos. A continuación, se describen brevemente las principales tecnologías empleadas y su relevancia en el contexto del proyecto.

### 1.4.1. Lenguajes de programación

**C++:** Lenguaje de programación de propósito general. Usado para generar el modelo el cual será enviado al resolutor optimización.[5]

**Python:** Utilizado por su versatilidad y amplia gama de bibliotecas científicas. Ha sido clave para el desarrollo del sistema web.[10]

**HTML:** Lenguaje de marcado el cual se usará para el diseño de la web.[3]

**CSS:** Lenguaje de diseño gráfico utilizado para definir y crear la presentación de la interfaz de la web.[2]

**JavaScript:** Empleado para el desarrollo del servicio web, utilizando frameworks como React para crear una interfaz de usuario interactiva y dinámica.[4]

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6610232 Código de verificación: QvciuC/y

Firmado por: KILIAN GONZÁLEZ RODRÍGUEZ  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha 11/07/2024 14:49:53

Jorge Riera Ledesma  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

11/07/2024 14:54:31

#### 1.4.2. Frameworks y librerías

**Flask:** Este framework de Python ha sido utilizado para la creación del prototipo web. Flask permite el desarrollo rápido y sencillo de aplicaciones web y APIs.[18]

**Pymongo:** Contiene herramientas para conectarse a MongoDB desde python.[8]

**JSON y BSON:** Usado para el manejo de información de ficheros con formato JSON.[15]

**Bootstrap:** Framework multiplataforma o conjunto de herramientas de código abierto usado para facilitar el diseño de servicio web y hacer que este sea responsive.[20]

**WTForms y FlaskWTF:** Facilitan la creación y validación de formularios web.[9]

#### 1.4.3. Bases de datos

**MongoDB:** Se trata de un sistema de bases de datos NoSql orientado a documentos. Se usará para dar soporte al contenido de la web como son la información acerca de las instancias creadas y los resultados de los mismos.[14]

#### 1.4.4. Herramientas de control de versiones

**Git:** Utilizado para el control de versiones del código fuente, facilitando la colaboración y el seguimiento de cambios a lo largo del desarrollo del proyecto.[11]

#### 1.4.5. Otras herramientas

**Visual Studio Code:** Editor de código fuente usado para desarrollar el proyecto.[17]

**IBM ILOG CPLEX Optimization Studio:** Resolutor de problemas encargado de obtener la solución óptima del modelo.[13]

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6610232 Código de verificación: QvcIuC/y

Firmado por: KILIAN GONZÁLEZ RODRÍGUEZ  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha 11/07/2024 14:49:53

Jorge Riera Ledesma  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

11/07/2024 14:54:31

## Capítulo 2

### Antecedentes y estado del arte

La optimización combinatoria [16], nacida a mediados del siglo XX, se ha desarrollado enormemente hasta la actualidad. Actualmente tiene importantes aplicaciones en el nivel industrial, informático, científico, etc., y en todos los ámbitos en que se presenten situaciones en que se requiera minimizar costos, demoras, recorridos, etc. El estudio de los problemas de optimización combinatoria se centra indudablemente en hallar métodos o algoritmos que procuren la resolución efectiva de los mismos. Pero surge inmediatamente la pregunta: ¿es siempre posible encontrar algoritmos que, en circunstancias del mundo real, en el aquí y ahora, posean la facultad de concedernos soluciones óptimas?

La respuesta no es muy alentadora. Muchos problemas de optimización combinatoria se encuentran contenidos en la clase NP-hard [16], o problemas en los que el tiempo de cómputo necesario para resolverlos crece de manera desproporcionada conforme aumenta el tamaño del problema. El desarrollo y uso de algoritmos para la programación de tareas ha evolucionado significativamente desde los primeros días de la computación. Los avances en hardware y software han permitido abordar problemas cada vez más complejos de manera eficiente y precisa. A día de hoy, la gran mayoría opta por el uso de algoritmos heurísticos, los cuales son capaces de obtener soluciones subóptimas a cambio de una velocidad de cómputo muy superior, en lugar de tratar de buscar la solución óptima.

Un problema de optimización combinatoria queda definido por un conjunto de instancias del problema y una prescripción de maximizar o minimizar. El problema con el que nos encontramos es un problema de planificación de tareas (Scheduling), entre los que nos podemos encontrar los siguientes:

**Single Machine scheduling:** Se centra en un solo recurso que debe completar todas las tareas asignadas.[7]

**Parallel Machine Scheduling:** Este tipo se refiere a la asignación de tareas a múltiples máquinas que funcionan en paralelo. Las máquinas pueden ser idénticas, uniformes (diferentes velocidades de procesamiento), o no relacionadas (diferentes capacidades y tiempos de procesamiento).[7]

**Flow Shop Scheduling:** En este tipo de programación, las tareas deben pasar por un conjunto predefinido de máquinas en un orden específico. Cada tarea sigue la misma secuencia de pasos.[6]

**Job Shop Scheduling:** Similar al Flow Shop, pero con una mayor flexibilidad. Cada trabajo es procesado en un conjunto de máquinas en un orden determinada. Un número de  $n$  trabajos deben ser procesados una sola vez por  $m$  máquinas, con un orden y durante un tiempo. Esto lo hace más complejo que el Flow Shop.[6]

**Open Shop Scheduling:** En este no hay un orden predefinido para que las tareas pasen por las máquinas. Cualquier tarea puede ser procesada por cualquier máquina en cualquier orden.[6]

Nuestro problema se puede entender que pertenece al tipo *Job Shop Scheduling*. Se considera un problema del tipo *NP*, haciendo que sea difícil de resolver. Nuestra manera de proceder consiste en un modelo, el cual es una descripción del problema en el que se especifican las variables y el conjunto de restricciones en términos de las variables. Tenemos también una función objetivo, que pretende maximizar la suma de los pesos asociados a los objetos seleccionados. Este modelo se entrega al resolutor *IBM ILOG CPLEX Optimization Studio* [13], el cual, mediante un algoritmo de ramificación y acotación sofisticado, genera una secuencia de mejores soluciones factibles a lo largo del tiempo, concluyendo con la solución óptima o hasta que sea detenido.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6610232 Código de verificación: Qvcuic/y

Firmado por: KILIAN GONZÁLEZ RODRÍGUEZ  
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha 11/07/2024 14:49:53

Jorge Riera Ledesma  
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

11/07/2024 14:54:31

## Capítulo 3

### Explicación del problema

En este trabajo se parte de la premisa de que el campo de visión en el cielo viene dado y contiene un conjunto de objetos de interés para el astrónomo. Teniendo en cuenta el tiempo concedido para la observación, no todos los objetos van a poder ser observados. El problema de optimización que se plantea en este artículo consiste en seleccionar un subconjunto de objetos y la secuencia de las observaciones que se pueden realizar dentro del tiempo de observación otorgado.

Algunos objetos en el campo de visión podrían requerir la rendija creada por las barras de varias bandas contiguas. Las bandas asignadas a cada objeto y el ancho de la rendija dependen de las características del objeto (brillo y densidad) y de su posición en el campo de visión.

Cada banda se compone de tres áreas horizontales, tal como se ilustra en la Figura 3.1a una zona muerta superior de longitud  $d_1$  segundos de arco, una zona central y una zona muerta inferior de longitud  $d_2$  segundos de arco. Los valores  $d_1$  y  $d_2$  están determinados por la necesidad de evitar los bordes de barra no uniformes en estas ubicaciones, debido al diseño mecánico de las barras, que deben ajustarse y deslizarse suavemente sobre las barras inferiores y superiores adyacentes a cada una.

Un objeto situado en el área central de una banda puede ser observado mediante la única rendija formada por las dos barras de dicha banda. Cuando un objeto se encuentra en la zona muerta superior o inferior de una banda, por razones técnicas, la observación de este objeto requiere la rendija creada por las barras de (al menos) dos bandas contiguas.

La Figura 3.1a muestra las tres áreas que dividen una banda, con un objeto en el área central. Las dos barras opuestas configuran una rendija que enfoca el objeto. La Figura 3.1b muestra dos bandas contiguas con un objeto situado en una zona muerta. Para observar dicho objeto, las barras en las dos bandas deben configurarse adecuadamente para generar una

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6610232 Código de verificación: QvciuC/y

Firmado por: KILIAN GONZÁLEZ RODRÍGUEZ  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha 11/07/2024 14:49:53

Jorge Riera Ledesma  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

11/07/2024 14:54:31



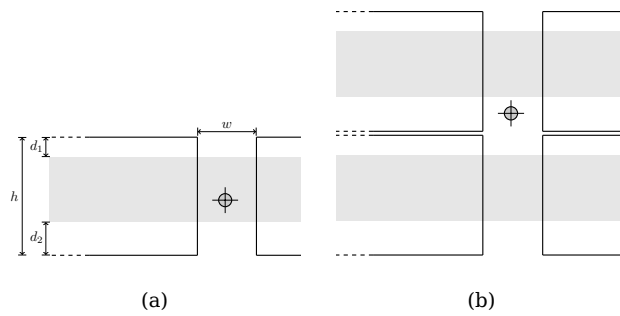


Figura 3.1: Detalles sobre bandas, rendijas y zona muerta.

rendija que rodee al objeto.

Como se ha mencionado, algunos objetos podrían necesitar tres o más bandas contiguas para ser observados.

Dado que las barras pueden configurarse de manera independiente, EMIR puede realizar muchas observaciones simultáneas (hasta 55), pero la sincronización de las barras necesaria para cada observación es fundamental para una gestión eficiente del telescopio. Además, mover una barra consume bastante tiempo, por lo que los tiempos de reconfiguración en el CSU son largos en EMIR. El uso eficiente del tiempo del telescopio impone una planificación cuidadosa para maximizar el rendimiento científico en el tiempo de observación disponible y limitado.

Dado un área en el cielo y una restricción temporal, este proyecto aborda el problema de seleccionar objetos de una lista y configurar las barras del CSU. La lista de potenciales objetos a ser observados, junto con sus prioridades, también son entradas al problema. El objetivo es procesar tantas observaciones priorizadas como sea posible.

Se refiere a este problema de optimización como Orienteering Problem with Synchronization (OPS) (véase, [19]), dado que tiene características del Orienteering Problem (véase, por ejemplo, la referencia [21]).

### 3.1. El problema

El OPS puede verse como un problema de planificación de tareas (Job Scheduling) donde el par de barras de cada banda representa un procesador configurable, y cada observación potencial representa un trabajo cuyo procesamiento podría requerir la configuración sincronizada de varios pro-

cesadores. Utilizando la terminología estándar en planificación de tareas, los procesadores son *no idénticos* en el sentido de que los procesadores para realizar cada trabajo se conocen a priori. No todos los trabajos deben realizarse, y cada uno de ellos tiene asociado un beneficio o premio.

El OPS lleva a cabo una selección de trabajos y propone una secuencia de configuraciones para cada procesador con el fin de maximizar la suma de los beneficios/premios de los trabajos seleccionados satisfaciendo la limitación de tiempo. Procesar un subconjunto de trabajos consume tiempos de ajuste de los procesadores implicados, tiempos de espera asociados con la sincronización y tiempos de procesamiento para los trabajos seleccionados. A continuación los parámetros de entrada, caracterizamos una solución factible e ilustramos todo el problema con un pequeño ejemplo.

### 3.2. Los parámetros de entrada

Sea  $J = \{1, \dots, n\}$  el conjunto de trabajos potenciales. Ningún trabajo en  $J$  es de ejecución obligatoria. Procesar un trabajo  $j$  produce un premio  $b_j$ , asociado con su prioridad. Cada observación asociada con un trabajo  $j \in J$  requiere un tiempo de procesamiento de  $p_j$  unidades. Configurar un procesador  $k$  desde que acaba trabajo  $i$  con el fin de procesar el trabajo  $j$  consume un tiempo de transición  $c_{ij}$ . Por conveniencia en la notación, denotamos  $t_{ij} = p_i + c_{ij}$ . De cara al modelo que presentamos después, también consideramos trabajos 0 y  $n+1$  que son trabajos ficticios iniciales y finales, respectivamente, y representan un *estado de seguridad* de los procesadores (en la aplicación astronómica representan el estacionamiento del par de barras de cada banda en medio del campo de visión). Sea  $p_j = b_j = 0$  para  $j \in \{0, n+1\}$ , y  $V = J \cup \{0, n+1\}$ . Sea  $K = \{1, \dots, m\}$  el conjunto de procesadores paralelos no idénticos configurables. Cada trabajo  $j$  requiere el subconjunto  $K_j \subseteq K$  de procesadores. Todos los procesadores en  $K_j$  necesitan estar simultáneamente en configuraciones específicas durante al menos  $p_j$  unidades de tiempo para realizar  $j$ . De manera similar, denotamos por  $J^k \subseteq J$  el conjunto de trabajos que requieren el procesador  $k$ . Sea  $V^k = J^k \cup \{0, n+1\}$ .

Sea  $G^k = (V^k, A^k)$  el *grafo de transición* para el procesador  $k$ , donde  $A^k$  es el conjunto de arcos entre todos los vértices en  $V^k$ , excepto los que salen de  $n+1$  o entran en 0. Sea  $G = (V, A)$  el grafo agregado donde  $A$  es un conjunto de tripletas  $(i, j, k)$  tal que  $k \in K$  y  $(i, j) \in A^k$ . Nótese que  $G$  es un

multigrafo ya que dos vértices pueden estar vinculados por varios arcos. Cada tripleta  $a = (i, j, k) \in A$  está asociada con una longitud  $t_a$  igual al tiempo  $t_{ij}$ . Finalmente, sea  $L$  la limitación de tiempo dada para realizar los trabajos seleccionados. Suponemos que  $L \geq t_{0j} + t_{j,n+1}$  para todo  $j \in J^k$  y  $k \in K$ .

### 3.3. Caracterización de las soluciones factibles

Caracterizamos una solución factible para el OPS mediante un camino elemental  $P^k \subset A^k$  desde 0 hasta  $n+1$  en  $G^k$  para cada procesador  $k \in K$ . El camino  $P^k$  representa la secuencia de trabajos que el procesador  $k$  debe procesar, comenzando y terminando en las posiciones de estacionamiento. No todos los trabajos necesitan ser visitados por una camino, pero cuando un camino visita un trabajo  $j$ , entonces todos los caminos  $P^k$  con  $k \in K_j$  deben visitar  $j$ . Además, debe existir un valor  $s_j$  para cada  $j \in V$  que cumpla:

$$s_i - s_j \leq -t_{ij} \quad k \in K, (i, j) \in P^k \quad (3.1)$$

$$s_{n+1} - s_0 \leq L. \quad (3.2)$$

El valor  $s_j$  representa el instante de comienzo del trabajo  $j$  y, junto con las restricciones (3.1), garantiza la sincronización de los procesadores al realizar ese trabajo. Es decir, todos los procesadores involucrados en el procesamiento de un trabajo específico  $j$  pueden llegar a la configuración para comenzar a procesar  $j$  en diferentes momentos, pero todos necesitan comenzar el proceso de  $j$  al mismo tiempo  $s_j$ . La desigualdad (3.2) limita el tiempo de procesamiento total.

El conjunto de desigualdades (3.1) y (3.2) es conocido como *System of Difference Constraints* (ver [1]). El OPS tiene como objetivo encontrar los caminos  $P^k$  y los valores  $s_j$  que maximicen la suma de los premios asociados con los trabajos seleccionados. Desde esa perspectiva, el OPS también puede considerarse como un problema de rutas de vehículos donde los trabajos son los clientes y los procesadores son los vehículos.

### 3.4. Un caso de uso

Presentamos en esta sección los parámetros de entrada y una solución factible para un pequeño ejemplo del OPS. La Figura 3.2 muestra una entrada compuesta por cinco observaciones potenciales enfocadas por un dispositivo con tres bandas. Los objetos 1, 4 y 5, situados en áreas

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6610232 Código de verificación: QvciuC/y

Firmado por: KILIAN GONZÁLEZ RODRÍGUEZ  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha 11/07/2024 14:49:53

Jorge Riera Ledesma  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

11/07/2024 14:54:31

intermedias, requieren las barras únicamente de una banda para poder ser observados. Los objetos 2 y 3, sin embargo, caen en zonas muertas, por lo que necesitan, para ser observados, de las barras de las bandas más próximas: las barras de las bandas 1 y 2 son necesarias para observar el objeto 2, mientras que para el objeto 3 se requieren las barras de las bandas 2 y 3. En concreto, en este ejemplo

$$J = \{1, 2, 3, 4, 5\}, \quad K = \{1, 2, 3\}, \quad J^1 = \{1, 2\}, \quad J^2 = \{2, 3, 5\}, \quad J^3 = \{3, 4\},$$

$$K_1 = \{1\}, \quad K_2 = \{1, 2\}, \quad K_3 = \{2, 3\}, \quad K_4 = \{3\} \quad \text{y} \quad K_5 = \{2\}.$$

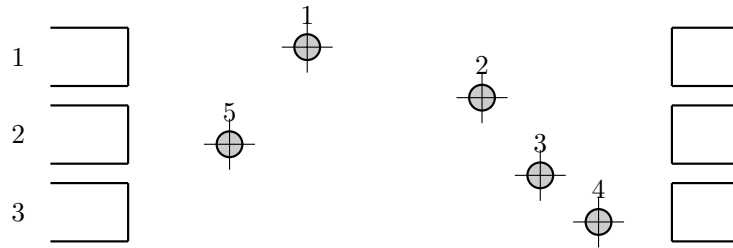


Figura 3.2: Ejemplo con cinco objetos y tres bandas

Supongamos que los costos de transición  $c_{ij}$  vienen dados por la distancia horizontal entre los objetos, con tiempos de procesamiento y premios (prioridades) iguales a una unidad para todos los objetos. La Figura 3.3 muestra todos los caminos válidos para cada una de las barras de cada banda.

Cada figura representa grafo de transición  $G^k$ , y cada arco representa el cambio de configuración de las barras de la banda  $k$ .

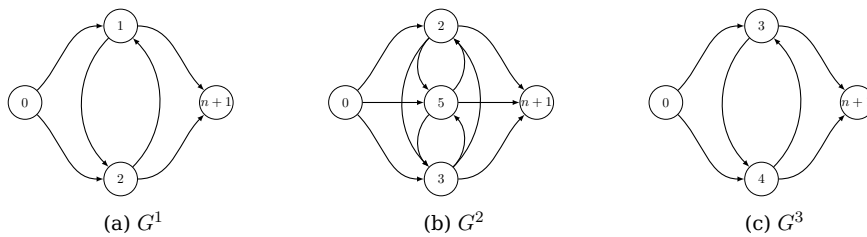


Figura 3.3: Grafo de transición para el ejemplo de la Figura 3.2

Cuando el límite de tiempo es  $L = 11$ , hay una solución factible para esta instancia que permite la observación de los cinco objetos. Esta solución

comienza configurando las barras de las bandas 1, 2 y 3 para observar los objetos 1, 5 y 4, respectivamente. Luego, las barras en las bandas 2 y 3 se configuran para observar el objeto 3. Finalmente, las barras de las bandas 1 y 2 se configuran para observar el objeto 2. Todas las barras comienzan en la configuración 0 y terminan en la configuración  $n + 1$ . La Figura 3.4 muestra los caminos elementales en los grafos de transición.

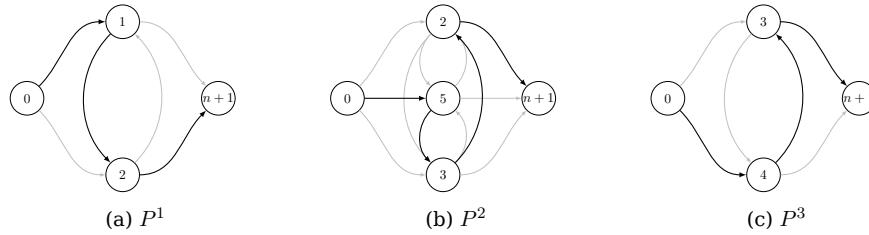


Figura 3.4: Camino elemental para el ejemplo de la Figura 3.2

El vector  $s = [0, 1, 8, 6, 4, 2, 11]$  contiene valores de tiempo de programación válidos, de acuerdo con el conjunto de desigualdades (3.1) y (3.2). La Figura 3.5 ayuda a entender la validez de esta solución. Obsérvese la existencia de ciertos momentos de inactividad para algunas de las barras debido a la necesidad de espera para la sincronización.

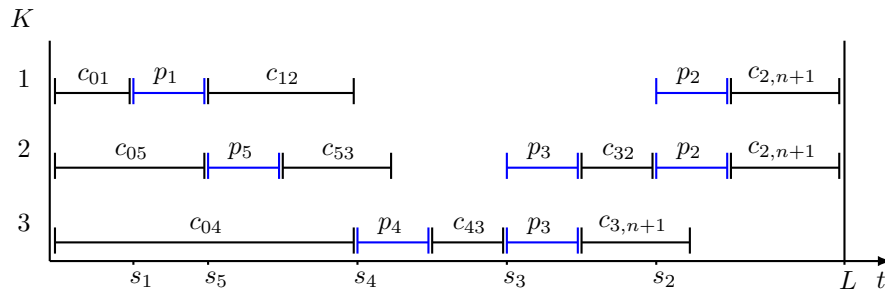


Figura 3.5: Diagrama asociado a una solución factible del ejemplo de la Figura 3.2

### 3.5. El modelo

Presentamos una formulación matemática para describir el OPS. Esta formulación se construye sobre las siguientes dos familias de variables. Para cada procesador  $k \in K$  y cada arco  $(i, j) \in A^k$ , la variable binaria  $x_{ij}^k$  representa si el procesador  $k$  está configurado para procesar el trabajo  $j$

inmediatamente después de haber procesado el trabajo  $i$ . Para cada trabajo  $j \in J$ , la variable binaria  $y_j$  determina si el trabajo  $j$  es seleccionado para ser procesado.

Nuestro modelo es una formulación compacta que también utiliza variables continuas para determinar el instante de inicio de cada observación seleccionada. Linealizamos las restricciones de tiempo y sincronización (3.1) y (3.2), observadas en el punto 3.3 (*Caracterización de las soluciones factibles*) utilizando el conocido método de la  $M$  grande.

Para simplificar la notación, definimos la siguiente notación estándar. Dado un procesador  $k \in K$  y un subconjunto de vértices  $S \subset V^k$ , utilizamos  $\delta_-^k(S) = \{(i, j) \in A^k \mid i \in V^k \setminus S, j \in S\}$  y  $\delta_+^k(S) = \{(i, j) \in A^k \mid i \in S, j \in V^k \setminus S\}$ . Si  $S = \{i\}$ , simplemente escribimos  $\delta_-^k(i)$  y  $\delta_+^k(i)$ . También utilizamos  $\delta_-(S) = \{(i, j, k) \in A \mid (i, j) \in \delta_-^k(S), k \in K\}$  y  $\delta_+(S) = \{(i, j, k) \in A \mid (i, j) \in \delta_+^k(S), k \in K\}$ .

Escribimos  $x^k(F)$  en lugar de  $\sum_{a \in F} x_a^k$  si  $F \subseteq A^k$ , y  $x(F)$  en lugar de  $\sum_{a \in F} x_a$  si  $F \subseteq A$ .

Como habíamos avanzado anteriormente, el modelo requiere variables continuas  $s_j$  para cada tarea  $j$  en  $V$ . La variable  $s_j$  representa el instante de inicio de la tarea  $j$ . A continuación, el siguiente modelo lineal entero mixto describe el OPS:

$$\text{máx} \sum_{j \in J} b_j y_j \quad (3.3)$$

sujeto a:

$$x^k(\delta_+^k(0)) = 1 \quad k \in K \quad (3.4)$$

$$x^k(\delta_-^k(n+1)) = 1 \quad k \in K \quad (3.5)$$

$$x^k(\delta_+^k(j)) - x^k(\delta_-^k(j)) = 0 \quad k \in K, j \in J^k \quad (3.6)$$

$$x^k(\delta_-^k(j)) = y_j \quad k \in K, j \in J^k \quad (3.7)$$

$$s_i - s_j + Lx_{ij}^k \leq L - t_{ij} \quad k \in K, (i, j) \in A^k \quad (3.8)$$

$$s_{n+1} - s_0 \leq L \quad (3.9)$$

$$x_{ij}^k \in \{0, 1\} \quad k \in K, (i, j) \in A^k \quad (3.10)$$

$$y_j \in \{0, 1\} \quad j \in J. \quad (3.11)$$

La función objetivo (3.3) maximiza la ganancia asociada con las tareas seleccionadas. Las ecuaciones (3.4) y (3.5) establecen, respectivamente,

la configuración de inicio y fin para cada procesador. Las ecuaciones (3.6) y (3.7) definen las variables  $y_j$ , y exigen que cada procesador  $k \in K_j$  debe procesar la tarea  $j$  si  $y_j = 1$  para cada  $j \in J$ . La restricción (3.9) es (3.2), y las restricciones (3.8) linealizan las restricciones (3.1). Tienen un triple papel: primero, garantizan la conectividad de las configuraciones para cada procesador en la tarea  $j$  con sus respectivas configuraciones de estacionamiento inicial y final, 0 y  $n + 1$ ; segundo, fuerzan que cada procesador  $k \in K_j$  esté adecuadamente configurado antes de comenzar a procesar una tarea seleccionada  $j$ ; y tercero, establecen una limitación en la duración del tiempo en cada procesador. Las restricciones (3.8) son conocidas en la literatura como desigualdades de Miller-Tucker-Zemlin (ver, por ejemplo, [12]). Finalmente, las cotas (3.10) y (3.11) establecen los límites de las variables  $x_{ij}^k$  y  $y_j$ , respectivamente.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6610232      Código de verificación: QvciuC/y

Firmado por: KILIAN GONZÁLEZ RODRÍGUEZ  
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha 11/07/2024 14:49:53

Jorge Riera Ledesma  
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

11/07/2024 14:54:31

## Capítulo 4

### Prototipo Web

#### 4.1. Aplicación

##### 4.1.1. Introducción

En el desarrollo del presente proyecto, se ha implementado un prototipo web utilizando el framework Flask. El prototipo permite la interacción con el motor de resolución desarrollado, facilitando la gestión de las instancias las cuales poseen los objetos astronómicos a observar.

A continuación, se detallan las características del prototipo web mediante las tecnologías utilizadas para desarrollo (véase las tecnologías usadas 1.4), además de cómo se ha integrado con el resto del sistema para cumplir con los objetivos del proyecto.

##### 4.1.2. Objetivos del prototipo

Este prototipo web tiene como objetivo principal proporcionar una interfaz accesible y fácil de usar para los gestores del espectrógrafo multiobjeto en el telescopio, permitiendo así poder ejecutar el modelo con la instancia deseada de manera sencilla.

Así bien también se espera que tanto los resultados del modelo, así como los ficheros de instancia con los objetos a observar, queden guardados para poder acceder a ellos y gestionarlos cuando se desee.

##### 4.1.3. Funcionalidades

###### Inicio - Home

Como se puede observar en la imagen (véase figura 4.1). Se ha implementado una interfaz sencilla en la que se le da la bienvenida al usuario, presentando información acerca del instrumento en cuestión. También se muestra una barra de navegación en la parte superior la cual permitirá al



usuario navegar entre las distintas páginas.

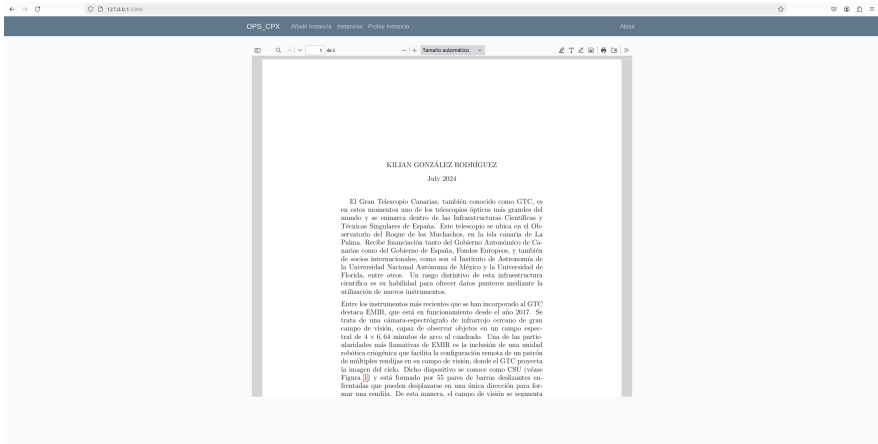


Figura 4.1: Interfaz del Inicio

Añadir instancias

Esta interfaz permite al usuario crear una instancia donde se especifican los objetos que se han de observar en cada rendija. Esta información puede ser escrita manualmente en la web, ó, mediante un fichero con el contenido mencionado, el cual rellena los campos (como se observa en la figura 4.2). Una vez se esté listo para crear la instancia, el servicio realiza una serie de comprobaciones del formato del contenido y guardará el contenido en la base de datos junto con la fecha en la que fue creada notificando al usuario.

Instancias

La interfaz a continuación (véase figura 4.3) tiene el objetivo de mostrar todas las instancias creadas mostrando su nombre y fecha de creación. Una vez seleccionada una de ellas se activan los botones que permiten eliminar, probar y descargar la instancia. Así bien, una vez seleccionada la instancia se muestra su contenido permitiendo modificarlo si se desea, esto elimina cualquier fichero con el resultado del modelo referente a la instancia en cuestión.

También se muestra si existe el contenido del fichero con el resultado de la instancia seleccionada. El fichero en cuestión no puede ser modificado pero sí sobrescrito, en el caso de que se volviese a ejecutar el modelo con la misma instancia. Para finalizar queda a disposición del usuario descargar

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a>	
Identificador del documento: 6610232	Código de verificación: QvciuC/y
Firmado por: KILIAN GONZÁLEZ RODRÍGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 11/07/2024 14:49:53
Jorge Riera Ledesma UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	11/07/2024 14:54:31

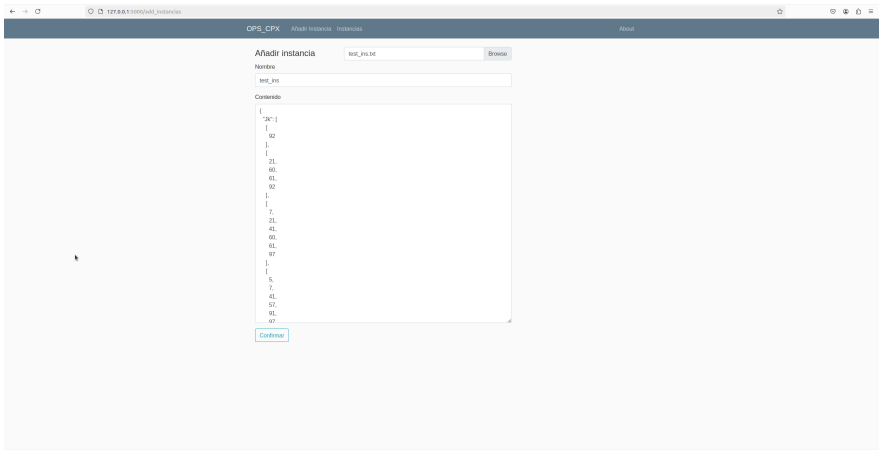


Figura 4.2: Interfaz de añadir instancias

la información de ambos ficheros si se desea, pudiéndose descargar el contenido con un simple clic.

Cabe destacar que la ejecución del modelo requiere de un tiempo de al menos un minuto, por ende mientras se esté ejecutando no se permitirá al usuario realizar algunas opciones, como volver a ejecutar el modelo hasta que finalice la ejecución previa. Así bien para que el usuario no piense que el servicio no está funcionando se notificará al usuario acerca del estado de ejecución del modelo.

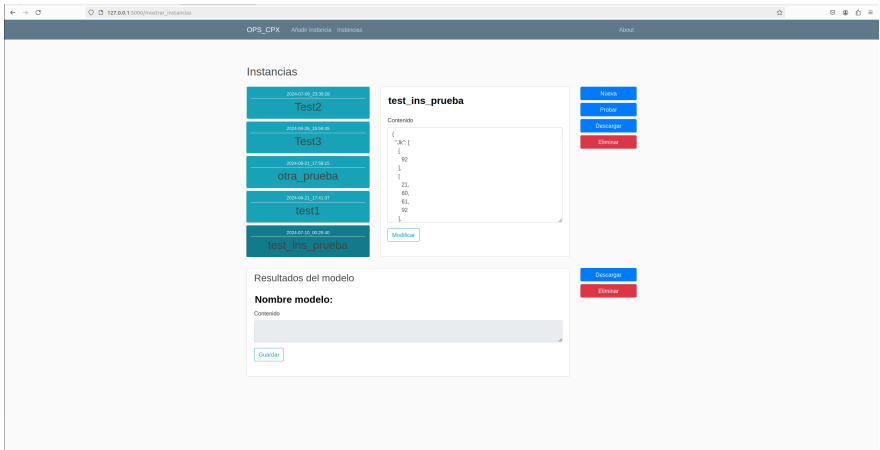


Figura 4.3: Interfaz de gestión de instancias

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a>	
Identificador del documento: 6610232	Código de verificación: QvciuC/y
Firmado por: KILIAN GONZÁLEZ RODRÍGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 11/07/2024 14:49:53
Jorge Riera Ledesma UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	11/07/2024 14:54:31

## About

En este lugar simplemente se muestra una interfaz simple, encargada de informar al usuario del funcionamiento así como otra información sobre el proyecto.

## Base de datos

El servicio web mantiene la información en una base de datos alojada en un servidor. Parte de información contenida (véase la figura 4.4) es el nombre de la instancia junto con el contenido, en donde se especifican los objetos a observar en cada rejilla. También contiene el resultado simplificado del modelo con el identificador del fichero.

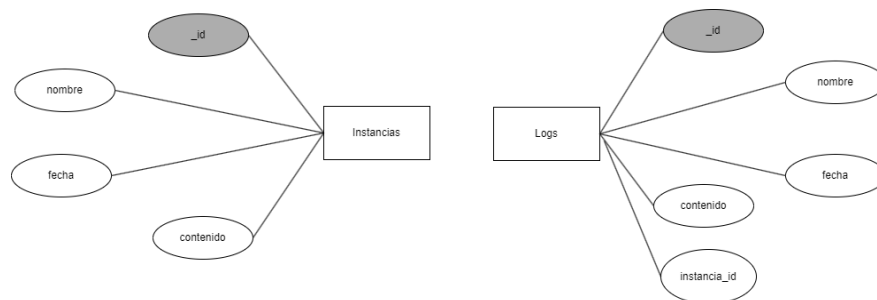


Figura 4.4: Diagrama de la base de datos

## 4.2. Resultados

Como consecuencia del desarrollo web, se generan una serie de resultados mediante el resolutor cuya información se guarda como un fichero en la base de datos. Como se puede observar en la tabla 4.1, el contenido del fichero muestra que el resolutor *Simplex* se ha ejecutado durante un tiempo limitado, mostrando la mejor solución viable encontrada, y, un gap dentro del cual se encuentra la mejor solución posible. Cabe destacar que la diferencia de la mejor solución factible encontrada y la mejor solución posible es ínfima.

Tabla 4.1: Resultados del modelo

Node	Left	Objective	lInf	Best Integer	Best Bound	ItCnt	Gap
* 0+	0			100	2660		—
0	0	2636.9975	243	100	2636.9975	346	—
* 0+	0			1265	2636.9975		108.46%
0	0	2623	222	1265	Cuts: 351	633	107.35%
0	0	2623	243	1265	Cuts: 229	902	107.35%
0	0	2623	170	1265	Cuts: 111	1072	107.35%
0	0	2623	200	1265	Cuts: 125	1183	107.35%
* 0+	0			1365	2623		92.16%
0	0	cutoff		1365	2623	1183	92.16%
Detecting symmetries...							
0	2	2623	128	1365	2623	1183	92.16%
Elapsed time = 4,64 sec, (334,71 ticks, tree = 0,02 MB, solutions = 3)							
2330	1038	2427	114	1365	2623	29829	92.16%
Elapsed time = 182,77 sec, (95133,42 ticks, tree = 13,58 MB, solutions = 17)							
327749	22478	2176	58	2142	2177	5893497	1.63%
338064	18291	2176	45	2142	2176.7739	6047176	1.62%
349600	16401	2176	50	2142	2176	6215641	1.59%
360615	14565	2175	32	2142	2176	6398622	1.59%
369832	12684	2175	28	2142	2175	6553675	1.54%
379570	10317	infeasible		2142	2170.9925	6763454	1.35%
388480	8830	infeasible		2142	2167	6885974	1.17%
400936	5993	infeasible		2142	2167	7075919	1.17%
411246	2482	infeasible		2142	2161	7254419	0.89%

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6610232      Código de verificación: QvciuC/y

Firmado por: KILIAN GONZÁLEZ RODRÍGUEZ  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha 11/07/2024 14:49:53

Jorge Riera Ledesma  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

11/07/2024 14:54:31

## Capítulo 5

### Conclusiones y líneas futuras

Las conclusiones extraídas tras la realización de este proyecto son satisfactorias. Aunque la planificación final del proyecto no ha sido la prevista, se han conseguido los objetivos marcados inicialmente y se han añadido otros como, por ejemplo, el desarrollo de una base de datos con *MongoDB*.

El prototipo web desarrollado con Flask cumple con los objetivos de proporcionar una herramienta accesible y eficiente para la gestión de las observaciones astronómicas con el espectrógrafo multiobjeto. La interfaz intuitiva, junto con las funcionalidades de creación, modificación, y ejecución de instancias, aseguran que los gestores puedan manejar de manera efectiva y eficiente las observaciones, optimizando así el uso del instrumento. La integración de la base de datos y la capacidad de descargar ficheros mejora aún más la usabilidad y la gestión de datos del sistema.

Gracias a la elaboración de este proyecto se ha aprendido a desarrollar un proyecto *Full Stack*, descubriendo cómo conectar los distintos componentes entre ellos como vendrían a ser la base de datos al prototipo web y este al modelo.

También se han perfeccionado conceptos relacionados con el desarrollo de un prototipo web, como por ejemplo, el uso de frameworks como *Bootstrap* para mejorar el diseño, permitiendo así una web responsive.

Además de conceptos teóricos o prácticos, este proyecto ha ayudado a realizar un aprendizaje personal en cuanto a la habilidad en la búsqueda de información, resolución de problemas, etc

El desarrollo del presente proyecto ha sentado una base sólida para la gestión eficiente de las observaciones astronómicas, gracias el uso del modelo *ILOG CPLEX Optimization Studio*, y, su uso en un servicio web el cual facilita su acceso. No obstante, siempre existen áreas de mejora y oportunidades para expandir las funcionalidades actuales. Las líneas futuras de este proyecto son:

Un objetivo deseable, y que se posterga hacia un trabajo futuro es: la posibilidad de mostrar la solución del modelo de manera gráfica. Al mostrar las 55 bandas y los objetos que se encontrarían en cada una en función del tiempo permitirían una mejor comprensión de la solución.

Otra línea de trabajo que se consideró en un momento fue la de mejorar

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6610232 Código de verificación: QvciuC/y

Firmado por: KILIAN GONZÁLEZ RODRÍGUEZ  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha 11/07/2024 14:49:53

Jorge Riera Ledesma  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

11/07/2024 14:54:31

el sistema de creación de instancias. Hasta ahora el gestor debe tener conocimientos para crear un fichero JSON con una información en concreto, en donde se ha de especificar los objetos a observar en cada banda y otros datos como el tiempo limite, fecha de observación, la constante alpha, etc. Para ello el diseño de una interfaz gráfica la cual muestre las bandas y permita crear objetos dentro de ella, así como rellenar la información necesaria a modo de formulario, facilitaría en gran medida la creación de estas instancias.

En un primer momento se pensó en permitir la posibilidad de permitir mandar una pila de ficheros con los objetos a observar, y, que el servicio web creara automáticamente las instancias. Una vez creadas, ejecutaran el modelo automáticamente, permitiendo así acelerar el proceso para el gestor encargado. Esta idea se descartó principalmente por la velocidad de ejecución del modelo el cual bloquearía varias de las funcionalidades de la web, por lo que habría que cambiar la estructura actual del proyecto.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6610232 Código de verificación: QvcIUc/y

Firmado por: KILIAN GONZÁLEZ RODRÍGUEZ  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha 11/07/2024 14:49:53

Jorge Riera Ledesma  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

11/07/2024 14:54:31

## Capítulo 6

### Conclusions and future works

**Conclusions and Future Directions** The conclusions drawn from this project are satisfactory. Although the final planning of the project did not go as initially intended, the objectives set at the beginning were achieved, and additional goals were met, such as the development of a database with MongoDB.

The web prototype developed with Flask meets the objectives of providing an accessible and efficient tool for managing astronomical observations with the multi-object spectrograph. The intuitive interface, along with the functionalities for creating, modifying, and executing instances, ensures that managers can effectively and efficiently handle the observations, thereby optimizing the use of the instrument. The integration of the database and the capability to download files further enhance the usability and data management of the system.

Through the completion of this project, valuable experience was gained in developing a Full Stack project, discovering how to connect the various components such as the database to the web prototype and the model. Concepts related to web prototype development were also refined, such as using frameworks like Bootstrap to improve design, allowing for a responsive web application.

In addition to theoretical or practical concepts, this project has facilitated personal learning in skills such as information searching and problem-solving.

The development of this project has laid a solid foundation for the efficient management of astronomical observations, thanks to the use of the *ILOG CPLEX Optimization Studio* model and its implementation in a web service that facilitates access. However, there are always areas for improvement and opportunities to expand current functionalities. The future lines of this

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6610232 Código de verificación: QvciuC/y

Firmado por: KILIAN GONZÁLEZ RODRÍGUEZ  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha 11/07/2024 14:49:53

Jorge Riera Ledesma  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

11/07/2024 14:54:31

project are as follows:

A desirable objective, which is postponed to future work, is: the possibility of displaying the model's solution graphically. By showing the 55 bands and the objects that would be in each one over time, it would allow for a better understanding of the solution.

Another area of work considered was improving the instance creation system. Currently, the manager needs to have knowledge to create a JSON file with specific information, where the objects to be observed in each band and other data such as time limit, observation date, alpha constant, etc., must be specified. Designing a graphical interface that shows the bands and allows creating objects within them, as well as filling in the necessary information in a form-like manner, would greatly facilitate the creation of these instances.

Initially, it was considered to allow the possibility of sending a stack of files with the objects to be observed, and the web service would automatically create the instances. Once created, they would execute the model automatically, thus speeding up the process for the manager in charge. This idea was mainly discarded due to the model's execution speed, which would block several functionalities of the web, necessitating a change in the current project structure.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6610232 Código de verificación: QvciuC/y

Firmado por: KILIAN GONZÁLEZ RODRÍGUEZ  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha 11/07/2024 14:49:53

Jorge Riera Ledesma  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

11/07/2024 14:54:31



## Capítulo 7

### Presupuesto

#### 7.1. Costes de recursos humanos

Para la realización de este proyecto se requiere a un desarrollador web, el cual se encargue de desarrollar tanto la base de datos como el servicio web que da soporte al modelo. El tiempo estimado de trabajo sería de unas 260 horas. Teniendo en cuenta que el precio de un programador junior ronda los 20€/h el costo ascendería a 5200€ (véase Figura 7.1).

#### 7.2. Costes de recursos materiales

Partiendo de la base de que no se dispone de ningún material, ó, que se requiere de material no usado previamente para evitar posibles defectos, se procede a estimar los costes de recursos materiales (véase Figura 7.2).

Hará falta un ordenador de sobremesa que posea la suficiente potencia para poder desarrollar el prototipo web. Los requisitos mínimos de este serían un procesador i7 de décima generación y una memoria ram de 16GB. Observando precios de ordenadores que cumplan dichas características, el presupuesto estimado sería de unos 750€.

Se necesitará también periféricos como una pantalla de ordenador, un ratón y un teclado. El precio estimado rondará los 280€. En este caso se ha optado por dos pantallas para facilitar el proceso de desarrollo.

También hay que tener en cuenta el coste de la licencia del modelo *ILOG CPLEX Optimization Studio*. La cuantía del alquiler del servicio es de 316€ al mes.

Por último, será necesario el alquiler de un servicio de hosting en el que se hospede nuestro servicio web y base de datos. Revisando precios se concluye que el precio rondará sobre los 10€ al mes, pudiendo variar debido al almacenamiento y velocidad solicitados.

### 7.3. Coste total

Teniendo en cuenta la estimación de costes de los recursos humanos y materiales necesarios para llevar a cabo el proyecto, se estima que el coste total asciende a unos 7000€. Cabe destacar que es una estimación del coste real, pudiendo variar dependiendo de diversos factores.

Tabla 7.1: Generated by Spread-LaTeX

Coste humano			
	Horas de trabajo	Precio/Hora	Coste Total
Aprendizaje de las tecnologías	60	20.00	1,200.00
Desarrollo	200	20.00	4,000.00
			5,200.00

Tabla 7.2: Coste de recursos materiales

Coste Material			
	Coste/Precio mensual	nº unidades/meses	Coste Total
Licencia	316.00	2	632.00
Servicio de hosting	10.00	2	20.00
Ratón	15.00	1	15.00
Teclado	25.00	1	25.00
Monitor	120.00	2	240.00
Ordenador	750.00	1	750.00
			1,682.00

### 7.4. Coste de mantenimiento

Una vez finalizado y entregado el proyecto. El demandante del servicio se hará cargo de los costes de mantenimiento (véase Figura 7.3).

Tabla 7.3: Coste de mantenimiento

Mantenimiento	
	Precio mensual
Licencia	316.00
Servicio de hosting	10.00
	326.00

Capítulo 8

Anexos

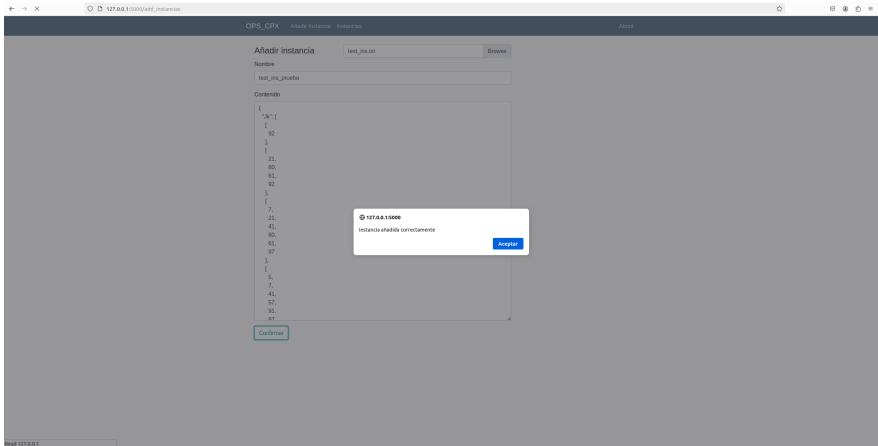


Figura 8.1: Ejemplo de aviso una vez creada una instancia

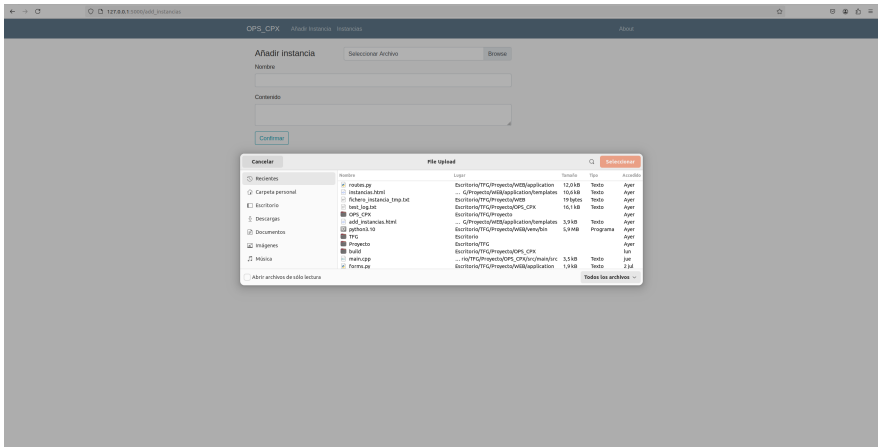


Figura 8.2: Ejemplo de creación de una instancia mediante el uso de un fichero

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a>	
Identificador del documento: 6610232	Código de verificación: QvciuC/y
Firmado por: KILIAN GONZÁLEZ RODRÍGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 11/07/2024 14:49:53
Jorge Riera Ledesma UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	11/07/2024 14:54:31

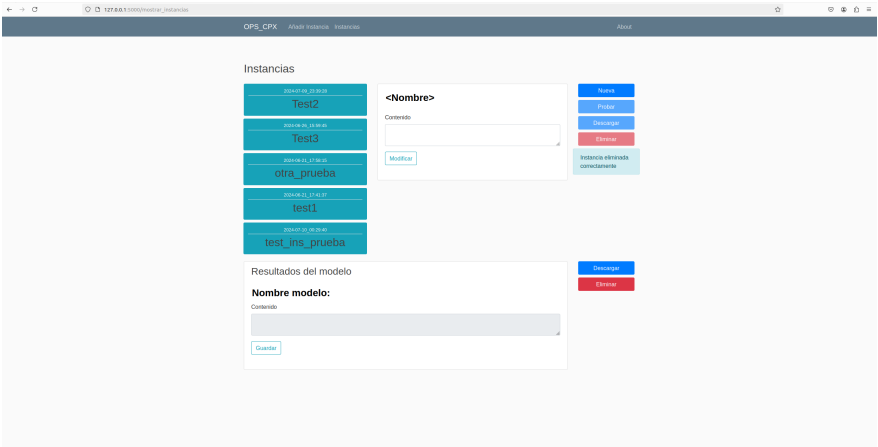


Figura 8.3: Ejemplo de eliminación de una instancia

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a>	
Identificador del documento: 6610232	Código de verificación: QvciuC/y
Firmado por: KILIAN GONZÁLEZ RODRÍGUEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 11/07/2024 14:49:53
Jorge Riera Ledesma UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	11/07/2024 14:54:31

## Bibliografía

- [1] Ravindra K. Ahuja, Thomas L. Magnanti y James B. Orlin. *Network Flows: Theory, Algorithms, and Applications*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA, 1993.
- [2] Mozilla Corporation's. *CSS Documentation*. <https://developer.mozilla.org/es/docs/Web/CSS>.
- [3] Mozilla Corporation's. *HTML Documentation*. <https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/HTML>.
- [4] Mozilla Corporation's. *JavaScript Documentation*. <https://developer.mozilla.org/es/docs/Web/JavaScript>.
- [5] cplusplus.com. *C++ Reference*. <https://cplusplus.com/reference/>.
- [6] José Eduardo Márquez Delgado. *Optimización de la programación (scheduling) en Talleres de Mecanizado*. [https://oa.upm.es/14713/1/JOSE\\_EDUARDO\\_MARQUEZ\\_DELGADO.pdf](https://oa.upm.es/14713/1/JOSE_EDUARDO_MARQUEZ_DELGADO.pdf). 2012.
- [7] José Eduardo Márquez Delgado. *Single and Parallel Machine Scheduling with Variable Release Dates*. <https://arxiv.org/pdf/2103.01785>. 2020.
- [8] PyMongo Developers. *PyMongo Documentation*. <https://pymongo.readthedocs.io/en/stable/>.
- [9] WTForms Developers. *WTForms Documentation (3.1.x)*. <https://wtforms.readthedocs.io/en/3.1.x/>.
- [10] Python Software Foundation. *Python documentation*. <https://docs.python.org/es/3.10/>.
- [11] GitHub. *GitHub Documentation*. <https://docs.github.com/es>.
- [12] Luis Gouveia y Jose Manuel Pires. "The asymmetric travelling salesman problem and a reformulation of the Miller-Tucker-Zemlin constraints". En: 112 (1999), págs. 134-146. url: [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(97\)00358-5](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00358-5).
- [13] IBM. *IBM ILOG CPLEX Optimization Studio*. <https://www.ibm.com/es-es/products/ilog-cplex-optimization-studio>.
- [14] MongoDB Inc. *MongoDB Compass*. <https://www.mongodb.com/products/tools/compass>.
- [15] JSON. *Introducing JSON*. <https://www.json.org/json-en.html>.
- [16] Jhon Jairo Santa Chávez Mauricio Granada Echeverri. *OPTIMIZACIÓN COMBINATORIA - de la teoría a la práctica -*. [https://www.researchgate.net/profile/Mauricio-Granada-Echeverri/publication/331196434\\_Optimizacion\\_combinatoria\\_-\\_de\\_la\\_teor%C3%ADa\\_a\\_la\\_pr%C3%A1ctica/links/5faabd0f299bf15bae065cf6/Optimizacion-combinatoria-de-la-teoria-a-la-practica.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Mauricio-Granada-Echeverri/publication/331196434_Optimizacion_combinatoria_-_de_la_teor%C3%ADa_a_la_pr%C3%A1ctica/links/5faabd0f299bf15bae065cf6/Optimizacion-combinatoria-de-la-teoria-a-la-practica.pdf)<https://arxiv.org/pdf/2103.01785>. 2016.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6610232

Código de verificación: QvciuC/y

Firmado por: KILIAN GONZÁLEZ RODRÍGUEZ  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha 11/07/2024 14:49:53

Jorge Riera Ledesma  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

11/07/2024 14:54:31

- [17] Microsoft. *Visual Studio Code*. <https://code.visualstudio.com/>.
- [18] Flask Project. *Flask Documentation (3.0.x)*. <https://flask.palletsprojects.com/en/3.0.x/>.
- [19] Jorge Riera-Ledesma y Juan-José Salazar-González. "Selective routing problem with synchronization". En: 135 (2021), pág. 105465. issn: 0305-0548. url: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2021.105465>.
- [20] Bootstrap Team. *Bootstrap Documentation (4.0)*. <https://getbootstrap.com/docs/4.0/>.
- [21] P. Vansteenwegen, W. Souffriau y D.V. Oudheusden. "The orienteering problem: A survey". En: 209 (2011), págs. 1-10. url: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2010.03.045>.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6610232      Código de verificación: QvciuC/y

Firmado por: KILIAN GONZÁLEZ RODRÍGUEZ  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha 11/07/2024 14:49:53

Jorge Riera Ledesma  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

11/07/2024 14:54:31