

DEPARTAMENTO DE
INGENIERÍA DE SISTEMAS Y AUTOMÁTICA



UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

TESIS DOCTORAL

DESARROLLO DE UN PLANIFICADOR PARA UNA RED HETEROGÉNEA DE TELESCOPIOS CON DIFERENTES ALGORITMOS DE DECISIÓN

M^a Carmen López Casado



Programa de Doctorado en Ingeniería Mecatrónica
Escuela de Ingenierías Industriales

Director: Dr. Carlos J. Pérez del Pulgar Mancebo

Tutor: Dr. Víctor F. Muñoz Martínez


2021



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

AUTOR: María Carmen Luisa López Casado

 <http://orcid.org/0000-0002-3583-051X>

EDITA: Publicaciones y Divulgación Científica. Universidad de Málaga



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode>

Cualquier parte de esta obra se puede reproducir sin autorización pero con el reconocimiento y atribución de los autores.

No se puede hacer uso comercial de la obra y no se puede alterar, transformar o hacer obras derivadas.

Esta Tesis Doctoral está depositada en el Repositorio Institucional de la Universidad de Málaga (RIUMA): riuma.uma.es

UNIVERSIDAD DE MÁLAGA



UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

TESIS DOCTORAL

**Desarrollo de un planificador para una red
heterogénea de telescopios con diferentes
algoritmos de decisión**

UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



Autora:

M^a Carmen LÓPEZ CASADO

Director:

Dr. Carlos Jesús PÉREZ DEL PULGAR

MANCEBO

Tutor:

Dr. Víctor Fernando MUÑOZ

MARTÍNEZ

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática

Programa de Doctorado en Ingeniería Mecatrónica

Escuela de Ingenierías Industriales

15 de febrero de 2021



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD DE LA TESIS PRESENTADA PARA OBTENER EL TÍTULO DE DOCTOR

D./Dña M^a CARMEN LÓPEZ CASADO

Estudiante del programa de doctorado EN INGENIERÍA MECATRÓNICA de la Universidad de Málaga, autor/a de la tesis, presentada para la obtención del título de doctor por la Universidad de Málaga, titulada: DESARROLLO DE UN PLANIFICADOR PARA UNA RED HETEROGÉNEA DE TELESCOPIOS CON DIFERENTES ALGORITMOS DE DECISIÓN

Realizada bajo la tutorización de VICTOR FERNANDO MUÑOZ MARTÍNEZ y dirección de CARLOS JESÚS PÉREZ DEL PULGAR MANCEBO (si tuviera varios directores deberá hacer constar el nombre de todos)

DECLARO QUE:

La tesis presentada es una obra original que no infringe los derechos de propiedad intelectual ni los derechos de propiedad industrial u otros, conforme al ordenamiento jurídico vigente (Real Decreto Legislativo 1/1996, de 12 de abril, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Propiedad Intelectual, regularizando, aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia), modificado por la Ley 2/2019, de 1 de marzo.

Igualmente asumo, ante a la Universidad de Málaga y ante cualquier otra instancia, la responsabilidad que pudiera derivarse en caso de plagio de contenidos en la tesis presentada, conforme al ordenamiento jurídico vigente.

En Málaga, a 15 de FEBRERO de 2021

M^a Carmen

Fdo.: M^a CARMEN LÓPEZ CASADO





UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

D. Carlos Pérez del Pulgar Mancebo, Profesor Ayudante Doctor y D. Víctor Muñoz Martínez, Catedrático de Universidad, ambos adscritos al Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad de Málaga, hacen constar

QUE

Son el primero director y el segundo tutor de la tesis titulada “DESARROLLO DE UN PLANIFICADOR PARA UNA RED HETEROGÉNEA DE TELESCOPIOS CON DIFERENTES ALGORITMOS DE DECISIÓN”, realizada por Dña. M^a Carmen López Casado, y que dicha autora ha llevado a cabo los objetivos de investigación propuestos para la completa elaboración de la Tesis, y que se encuentra en disposición de la defensa de la misma ante el Tribunal Examinador.

UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

Málaga, 15 de febrero de 2021



Fdo. D. Carlos Pérez del Pulgar Mancebo

Fdo. Víctor F. Muñoz Martínez



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

A mi abuelo...

UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA





UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

Agradecimientos

Esta tesis doctoral ha sido un largo recorrido en el que gracias a familiares, amigos y compañeros he podido realizar acompañada.

En primer lugar quiero agradecer todo el apoyo recibido de mi familia, principalmente a Rafa, mi marido. Gracias por la inestimable ayuda que me has brindado, tanto técnica como emocional. Por estar siempre ahí y ser mi apoyo incondicional. También quiero agradecerle a mis dos tesoros, a Darío y a Alba, el tiempo que me han regalado. Aunque he intentado que esta tesis doctoral no me quitara tiempo de ellos, ha sido inevitable. Por último, quiero agradecerle a mis padres los valores de esfuerzo, constancia y superación que me han inculcado desde pequeña, gracias a ellos esta tesis se ha podido realizar.

A mis compañeros del laboratorio por todo el apoyo técnico y moral que siempre han tenido disponible para mí, y en general a todos mis compañeros del departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática. En especial, quería darle las gracias a Irene por sus buenos consejos y las charlas mantenidas justo en los momentos necesitados.

A Alberto Castro por los conocimientos astronómicos tan necesarios para la realización de esta tesis y por estar siempre pendiente de la evolución de la misma.

Y por último, pero no por ello menos importante, quería darle las gracias a Víctor y a Carlos por haber confiado en mí desde el principio. Gracias Víctor por todo el pensamiento crítico y científico aprendido a tu lado. Carlos, gracias por haber aceptado mis tiempos para la realización de esta tesis, por habérmela propuesto y por haber confiado en mí para su realización. Gracias por todo el tiempo que me has dedicado y por todos los consejos que has compartido conmigo. Gracias por ayudarme en todo.



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

Resumen

Existe gran variedad de redes de telescopios que se dedican tanto a fines profesionales como a fines educativos y sociales, acercando la astronomía a los centros educativos y a la sociedad en sí. La red GLORIA nació con el objetivo de aunar en una única red ambos objetivos: utilidad para los astrónomos profesionales y herramientas atractivas para hacer que la ciudadanía en general participe en actividades astronómicas.

Para conseguir estos fines, la red es administrada por un planificador que recibe peticiones de observación por parte de los usuarios, y decide el mejor telescopio para ejecutarlas. El objetivo es maximizar el número de observaciones aceptadas y minimizar el tiempo transcurrido entre la solicitud realizada por el usuario y su ejecución. Esta cuestión se plantea como un problema de optimización multiobjetivo.

Esta tesis aborda el diseño e implementación del planificador de la red de telescopios que optimiza dichos objetivos. Para ello es clave el módulo que decide a qué telescopio será ofrecida cada petición de observación, ya que evitará ofrecerla a un telescopio que finalmente no pueda ejecutarla. De este modo, se han diseñado y posteriormente evaluado tres algoritmos distintos de selección de telescopio. El primero se basa únicamente en la predicción meteorológica en la ubicación del observatorio; el segundo emplea más información que se engloba en un modelo de lógica difusa que realiza la decisión; por último, se ha diseñado un algoritmo probabilístico que adapta su decisión a los cambios que se produzcan en la red.

Para realizar una adecuada comparación de los tres algoritmos hay que someterlos a las mismas condiciones, para ello se ha creado un modelo de la red de telescopios que ha sido validado a través de la información obtenida de la red real. La comparación realizada revela que el algoritmo probabilístico es el que obtiene mejor rendimiento en la red y obtiene la mejor optimización de los objetivos fijados, hecho constatado al comparar el frente de Pareto de los tres algoritmos.





UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

Índice general

Agradecimientos	IX
Resumen	XI
Índice de figuras	XVIII
Índice de tablas	XIX
1. Introducción	1
1.1. Contexto y motivación	1
1.2. Hipótesis de partida y contribuciones	4
1.3. Marco de realización	6
1.4. Estructura	7
2. Estado del Arte	9
2.1. Introducción	9
2.2. Técnicas de planificación	13
2.3. Simulación de telescopios y redes de telescopios	22
2.4. El proyecto GLORIA	27
2.5. Conclusiones	31
3. Metodología	33
3.1. Introducción	33
3.2. Metodología seguida para el desarrollo del planificador	33
3.3. Metodología seguida para el desarrollo de los algoritmos de decisión	34
3.4. Metodología seguida para el desarrollo del modelo de la red	36
4. Planificador de observaciones	39
4.1. Introducción	39



4.2. Usuario	40
4.3. Nodo central	46
4.4. Nodo local	47
4.5. Flujo de la peticiones	48
5. Algoritmo de decisión	51
5.1. Introducción	51
5.2. Algoritmo meteorológico	56
5.3. Algoritmo de lógica difusa	59
5.4. Algoritmo probabilístico	64
5.5. Discusión	72
5.6. Conclusiones	73
6. Modelo de la red GLORIA	75
6.1. Introducción	75
6.2. Procesamiento de parámetros de entrada	76
6.3. Planificador de la red	81
6.4. Telescopio	82
6.5. Realimentación	85
7. Implantación y Resultados	87
7.1. Introducción	87
7.2. Implementación del planificador	89
7.3. Resultados en la red	90
7.4. Implementación del modelo	93
7.5. Resultados en simulación	95
7.5.1. Validación del modelo	95
7.5.2. Comparativa de algoritmos	97
7.6. Discusión	103
8. Conclusiones y líneas futuras	105
8.1. Conclusiones	105
8.2. Hipótesis y contribuciones	107
8.3. Publicaciones	108



8.4. Líneas futuras	110
A. Diseño UML	113
A.1. Diagramas de secuencia	113
A.2. XSD	114
B. Lógica Difusa	117
B.1. Conjuntos difusos	117
B.2. Proceso de inferencia difusa	118
C. Modelo de regresión lineal generalizada	121
Glosario de Términos	125
Notación	129



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

Índice de figuras

2.1.	Diagrama de actividad del planificador de CTA (Colomé et al., 2014)	18
2.2.	Esquema del planificador de dos ciclos de ALMA (Solar et al., 2016)	19
2.3.	Arquitectura de la red de telescopios propuesta por Giakoumidis et al. (2012). 24	
2.4.	Esquema de las herramientas de simulación del LSST (Connolly et al., 2014). 26	
2.5.	Localización geográfica de los telescopios de la red GLORIA.	27
2.6.	Interfaz web del experimento planificado de la red GLORIA en el que se muestran todos los parámetros que puede completar el usuario.	30
4.1.	Arquitectura del planificador.	40
4.2.	Diagrama de flujo de las peticiones de observación.	49
5.1.	Esquema del algoritmo de decisión basado en lógica difusa.	59
5.2.	Representación de la variable Puntuación del Telescopio (ϕ_i^j).	65
5.3.	Esquema del algoritmo de decisión probabilístico.	67
5.4.	Representación de la variable Puntuación del Telescopio (ϕ_i^j).	70
6.1.	Modelo de la red GLORIA dividido en tres partes principalmente: el planificador, los telescopios y los parámetros de entrada. Las líneas sólidas representan el camino que la petición de observación sigue desde que es solicitada por el usuario. Las líneas a rayas representan los datos de entrada. Por último, las líneas punteadas representan información interna.	77
6.2.	Comparación entre el modelo y el histograma real para los parámetros de información meteorológica de dos telescopios de la red GLORIA.	81
6.3.	Modelo del telescopio.	83
7.1.	Diagrama de componentes de la arquitectura del planificador.	89
7.2.	Tasa de aceptación por algoritmo durante el período de evaluación.	91

7.3. Agrupación de las observaciones completadas en función del número de pasos del proceso de reasignación para cada uno de los algoritmos evaluados.	91
7.4. Frente de Pareto para porcentaje de aceptación por número de pasos máximo frente al número de pasos de reasignación.	92
7.5. Puntuación de los telescopios durante el período de evaluación.	93
7.6. Comparativa entre el porcentaje de aceptación de la red GLORIA y el obtenido en la simulación para cada telescopio por separado.	96
7.7. Comparativa entre el porcentaje de aceptación total de la red GLORIA con el obtenido con la simulación del modelo de red implementado. Ambos, tanto los datos reales como los simulados, han sido adquiridos utilizando el modelo de decisión de telescopio de lógica difusa.	97
7.8. Comparativa entre los diferentes algoritmos de decisión de telescopio bajo las mismas condiciones de simulación.	99
7.9. Resultados de la simulación cuando uno de los telescopios de la red es cancelado. Comparativa entre el porcentaje de aceptación total de la red cuando el telescopio se cancela y cuando se mantiene activo	100
7.10. Adaptación del modelo de regresión utilizado en el algoritmo de decisión probabilístico cuando el telescopio 2 es cancelado.	101
7.11. Probabilidad condicional de que una observación sea aceptada por el telescopio 2 cuando éste es cancelado.	102
7.12. Comparativa del número de pasos de reasignación entre los diferentes algoritmos de decisión con el telescopio 2 es cancelado	103
7.13. Frontera de Pareto para el porcentaje de aceptación de la red frente al número máximo de pasos de reasignación.	104
A.1. Diagrama de secuencia asociado a la petición de una observación.	114
A.2. Diagrama de secuencia asociado a la obtención del resultado de una observación ofrecida a un telescopio.	115
A.3. Esquema XSD de la petición de observación.	116
B.1. Interpretación de las reglas <i>if-then</i> (Mathworks, 2020).	118



Índice de tablas

2.1. Características de las redes de telescopios.	14
2.2. Características de los telescopios de la red GLORIA.	28
4.1. Parámetros de la petición de observación.	42
5.1. Tipos de parámetros.	61
5.2. Funciones miembros del modelo de lógica difusa.	62
5.3. Puntuación de los telescopios con predicción nubosa	63
5.4. Puntuación de los telescopios con predicción despejada	64
5.5. Funciones de pertenencia del modelo difuso.	68
5.6. Puntuación del telescopio	69
5.7. Relación entre los parámetros de los algoritmos de decisión y las funciones de disponibilidad.	72
C.1. Funciones de enlace.	123



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

Capítulo 1

Introducción

1.1. Contexto y motivación

A lo largo de las últimas décadas, el número de redes de telescopios ha aumentado considerablemente debido al gran interés que existe en acercar la astronomía a los estudiantes y a la ciudadanía en general (Castro-Tirado et al., 2014; Gresham et al., 2016; Panetta, 2016). Este tipo de redes convive con otras dirigidas exclusivamente a astrónomos profesionales en las que se combina información procedente de los distintos telescopios. Tal es el caso de la red BOOTES (Castro-Tirado et al., 2012), la red TAROT (Boër et al., 2017) o la red MASTER (Gorbovskoy et al., 2013). Estas tres redes han sido concebidas para el seguimiento y estudio de las explosiones cósmicas de rayos-gamma; la red TAROT, además, se utiliza para el descubrimiento de supernovas y el seguimiento de basura espacial; mientras que la red MASTER es utilizada también para descubrir objetos no catalogados. Por otro lado, también existen redes de telescopios que hacen convivir tanto su faceta profesional como la amateur. Un ejemplo es el observatorio Global de Las Cumbres (LCOGT) (Volgenau and Boroson, 2016). Esta red combina observaciones estáticas, en las que se observa un objeto en un instante determinado de tiempo, y lo que se ha llamado astronomía en el dominio del tiempo, observación de fenómenos astronómicos a lo largo del tiempo.

La mayor parte de las redes de telescopios existentes son homogéneas (Ocaña et al., 2016; Zimmer et al., 2015), es decir, la instrumentación de la que se compone cada telescopio es exactamente igual. De esta manera, se obtienen resultados equivalentes independientemente del telescopio empleado para la observación. Sin embargo, algunas de estas redes son heterogéneas, diseñadas con una instrumentación diferente. Un ejemplo

es el caso de LCOGT (Pickles et al., 2014), donde se emplearon telescopios con distinta apertura, pero localizados en el mismo observatorio. Esto les permitió una mejor monitorización de objetos que varían en el tiempo.

Las redes de telescopios tienen el potencial de permitir una mayor utilización de los recursos e incluir nuevas modalidades de observación. Históricamente, las peticiones de observación en telescopios individuales se hacían de forma legible para el ser humano, y cualquier conflicto entre las solicitudes era resuelto por una persona, a menudo trabajando directamente con el astrónomo solicitante. Este tipo de programación manual no es práctica para redes de telescopios debido al gran número de peticiones que se reciben y a la complejidad que supone elegir entre múltiples recursos. En estos casos, los usuarios realizan peticiones de observación, cuya gestión está supeditada a un planificador que es el encargado de su coordinación.

Las peticiones de observación incluyen información sobre el objeto que se quiere observar y cómo observarlo (altitud mínima del objeto, distancia a la luna...), las restricciones. Teniendo en cuenta toda esta información, el planificador propondrá la observación a un telescopio específico el que, a continuación, ejecutará la observación. El diseño e implementación del planificador dentro de la red de telescopios puede ser distribuido o totalmente centralizado. En redes distribuidas (Racero et al., 2015), normalmente aparece un nodo central que toma la decisión de a qué telescopio enviar la petición y éstos planifican individualmente todas las peticiones recibidas. Por otro lado, en las redes centralizadas (Saunders et al., 2014) el nodo central planifica y ejecuta todas las peticiones, actuando los telescopios como meros secuenciadores: recibiendo instrucciones y ejecutándolas.

La mayoría de las redes de telescopios, independientemente del tipo que sean, siguen un esquema de planificación basado en crear una batería de observaciones para un período de tiempo determinado, normalmente una noche. La elección del orden de las observaciones es un problema de optimización que puede ser resuelto de diversas formas: algoritmos genéticos (Sosnowska et al., 2014), programación lineal en enteros mixta (Solar et al., 2016), etc. Sin embargo, éste no es el único método propuesto de planificación. Existe otra tendencia que se basa en puntuar todas las observaciones pendientes en cada instante de ejecución. Esta puntuación se realiza siguiendo una métrica determinada que normalmente depende de las restricciones especificadas en la petición de observación

(Delgado and Reuter, 2016). De manera que la siguiente observación a ejecutar es la que ha obtenido la mejor puntuación.

Tal y como se ha explicado anteriormente, las redes de telescopios existentes se han desarrollado teniendo en cuenta que cada telescopio es empleado de manera exclusiva para unos fines científicos concretos. Sin embargo, la creación de redes heterogéneas permite agrupar telescopios ya existentes que se emplean para fines científicos distintos. En este tipo de redes, los telescopios se emplean de manera compartida entre sus propietarios y la red. De esta manera, se pueden mantener las actividades propias de cada telescopio y generar nuevos campos de actuación conjunta.

En 2011, el proyecto GLORIA (Castro-Tirado et al., 2014) comenzó con el objetivo de crear una red de telescopios global donde los usuarios pudiesen investigar en astronomía realizando observaciones y/o analizando datos que otros usuarios hubieran adquirido. Este proyecto integra telescopios que ya estaban siendo utilizados en distintas áreas científicas y de diseminación, creando una red heterogénea de telescopios donde el tiempo efectivo de los telescopios se comparte entre los propietarios de los mismos y los usuarios de la red GLORIA.

La mayoría de las redes de telescopios que actualmente existen tienen una característica común: los telescopios que la componen son sólo utilizados a través de la red y comparten el mismo sistema de control. Sin embargo, tal y como se ha visto anteriormente un factor clave de la red GLORIA es el uso compartido de los telescopios: la idea es ofrecer a la red, al menos, el tiempo ocioso de los mismos. Esto hace que la red GLORIA sea heterogénea, no sólo porque los telescopios tengan características diferentes, sino porque existen distintos sistemas de control para gestionarlos: RTS2 (Kubánek, 2016), ACP (Denny, 2011), etc.

El principal objetivo de la red GLORIA es maximizar el número de observaciones ejecutadas por la red, así como minimizar el tiempo que transcurre desde que el usuario solicita la observación y recibe la imagen. Para conseguir ambos objetivos, la decisión del telescopio al que se va a ofrecer la observación es un proceso clave. Si un telescopio no puede ejecutarla dentro de la planificación que tiene para esa noche, el proceso se hará más largo puesto que habrá que ofrecer la misma observación a otro telescopio, pero ya habrá transcurrido una noche completa. Para evitar ofrecer una observación a

un telescopio que no puede llevarla a cabo y hacer, entonces, el proceso más largo, el algoritmo de decisión de telescopios es crucial.

El proceso de decisión del telescopio que finalmente ejecutará la observación es realizado en algunas redes de telescopios mediante algoritmos de optimización en los que el telescopio es un parámetro más a optimizar dentro del proceso completo de planificación (Arregui et al., 2012; Lampoudi et al., 2015). En otras redes, la elección del telescopio se realiza previamente por el usuario al generar la petición de observación, creándose baterías de observaciones para cada uno de los telescopios (Racero et al., 2015).

1.2. Hipótesis de partida y contribuciones

El objetivo principal de esta tesis es el desarrollo de un planificador para redes de telescopios heterogéneas, particularizado para la red GLORIA. Dicho planificador debe maximizar el número de observaciones ejecutadas, así como minimizar el tiempo que transcurre desde que el usuario solicita la observación hasta que recibe la imagen.

Así mismo, se considera también como objetivo el desarrollo de un entorno de simulación que permita estudiar el comportamiento de dicho planificador.

A partir de estos objetivos se formulan las siguientes hipótesis sobre las que se sustenta el trabajo realizado.

- **El problema de optimización multiobjetivo se puede solucionar eligiendo adecuadamente a qué telescopio se le ofrece la observación.**

El principal problema que se debe afrontar en este trabajo es que no se tiene el control total sobre los telescopios que forman la red y en particular sobre el planificador de los mismos. Tal y como se ha expuesto en el apartado 1.1, las observaciones van a ser ofrecidas a los telescopios que las incluirán en su planificador local. No existe opción de controlar el proceso de planificación de los telescopios y poder asignarle un tiempo determinado en un telescopio a una observación. Todo esto implica que la base del planificador recaiga sobre la decisión del telescopio al que se le ofrecerá la observación. De ahí que se pretenda resolver el problema de optimización planteado para cumplir los objetivos especificados, a través de un algoritmo de decisión de telescopio. Recayendo sobre el mismo la responsabilidad de obtener un compromiso adecuado entre la consecución de ambos objetivos. Es por ello que

se va a analizar el comportamiento de tres algoritmos distintos. La elección de la tecnología base del algoritmo determinará la efectividad del mismo.

- **El entorno de simulación se puede basar en un sistema de eventos discretos, modelando la red a partir de datos reales.**

Se pretende modelar la red GLORIA a partir de los datos adquiridos de la red real y utilizar un sistema de eventos discretos para simular el comportamiento de la misma y así poder comparar los distintos algoritmos de decisión de telescopio.

Teniendo en cuenta el problema planteado y las hipótesis de partida anteriormente expuestas, la presente tesis ofrece resultados teóricos, experimentales y reales acerca del desarrollo del planificador anteriormente indicado. En particular caben destacar las siguientes contribuciones:

- **Diseño, desarrollo y puesta en producción de un planificador para una red de telescopios heterogénea.**

Se ha diseñado un planificador para gestionar y asignar a un determinado telescopio las observaciones solicitadas por los usuarios. El diseño se ha realizado teniendo en cuenta, por un lado que el planificador será utilizado en una red heterogénea; y por otro lado, que debe cumplir unos objetivos específicos. Los objetivos son: maximizar el número de observaciones completadas con éxito, es decir, aquellas en las que finalmente se haya podido observar el objeto deseado; y minimizar el tiempo de espera del usuario, definido éste como el tiempo transcurrido desde que solicita la observación hasta que obtiene el resultado de la misma. En cuanto a la heterogeneidad de la red, hay que tener en cuenta que viene dada tanto por tener los telescopios distintas características, como por utilizar distintos sistemas de control. Una vez desarrollado, el planificador se puso en producción en la red GLORIA, donde se llevaron a cabo las pruebas y test pertinentes para comprobar su correcto funcionamiento.

- **Definición de diferentes algoritmos de decisión para la planificación.**

Análisis del problema de optimización multiobjetivo que se plantea al intentar cumplir los dos objetivos del planificador. Por un lado, maximizar el número de observaciones completadas con éxito y por el otro, minimizar el tiempo de espera del

usuario. Dentro de este análisis se ha constatado que el módulo clave dentro del planificador para poder cumplir los objetivos establecidos es el algoritmo que decide a qué telescopio se ofrece cada observación solicitada. Se han definido tres algoritmos diferentes que se han analizado y comparado para ver cuál de los tres se adecua mejor a los objetivos establecidos.

El primero de ellos sólo tiene en cuenta una variable, la predicción del tiempo atmosférico en la ubicación del telescopio. Esta variable es la principal causa de no ejecución de una observación en un telescopio, puesto que si la noche no es clara, es decir, hay nubosidad o precipitaciones, la cúpula del observatorio estará cerrada y no se podrá ejecutar ninguna observación. El segundo algoritmo incluye nuevas variables utilizando lógica difusa, tales como la calidad del objeto a observar desde cada observatorio o la satisfacción del usuario con respecto a los telescopios. Y finalmente, el tercer algoritmo va adaptando su respuesta en función del comportamiento de cada telescopio en un intervalo de tiempo anterior.

- **Desarrollo de un entorno de simulación.**

Teniendo en cuenta los datos reales obtenidos de la red GLORIA, se ha realizado un modelo de la misma que permite comparar bajo las mismas condiciones los tres algoritmos de decisión definidos. Se han modelado cada uno de los telescopios de la red, así como los parámetros de entrada de la misma.

El modelo se realizará utilizando SimEvents, el motor de simulación de sistemas de eventos discretos de Matlab.

1.3. Marco de realización

La realización de esta tesis surge a raíz de la participación del grupo de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad de Málaga en el proyecto GLORIA (Global Robotic telescopes Intelligent Array for e-Science). Este proyecto, financiado por la Unión Europea bajo el Séptimo Programa Marco (FP7/2007-2012) con número de concesión 283783, tenía como objetivo principal la creación de una red de telescopios mundial donde tanto los ciudadanos en general como los astrónomos profesionales pudieran realizar observaciones o analizar datos previamente adquiridos. En concreto, este trabajo se

ha centrado en el diseño e implementación del planificador de observaciones de dicha red.

Aunque el proyecto GLORIA finalizó en diciembre de 2015, este trabajo pudo continuar, en parte, gracias a la creación en 2013 de una Unidad Asociada de I+D+i al IAA-CSIC (Instituto de Astrofísica de Andalucía) en el Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad de Málaga. Esta unidad, que pretende impulsar sinergias y alianzas entre las instituciones, está constituida por un grupo interdisciplinar de ambas entidades. Dentro de las actividades asociadas a esta Unidad se enmarcaba la finalización de este trabajo de tesis.

1.4. Estructura

Esta tesis está dividida en 8 capítulos, 3 anexos y las referencias bibliográficas asociadas a los mismos. Cada uno de los capítulos, a excepción del actual, analiza en profundidad los distintos problemas a resolver en esta tesis, comenzando con una introducción que lo plantea.

El capítulo 2 se centra en el estado del arte asociado a las técnicas de planificación y simulación en las redes de telescopios. Se hace un recorrido por las técnicas más relevantes y utilizadas en las redes de telescopios existentes, así como en la necesidad de simulación de parte de su estructura o su totalidad como mecanismo para mejorar y optimizar el rendimiento de las mismas. Este capítulo incluye también un apartado dedicado en exclusiva a la red de telescopios GLORIA, a su funcionalidad y a los distintos telescopios que la componen.

Posteriormente, el capítulo 3 analiza la metodología seguida en la realización de esta tesis. Se describen los distintos pasos realizados para la consecución de las distintas contribuciones indicadas anteriormente.

A continuación, el capítulo 4 se centra en el planificador de la red GLORIA. Se define su estructura en capas y los distintos elementos que la componen, indicando las funciones que cada uno de ellos realiza. Se incluye también un apartado en el que se analiza todo el recorrido que hace una petición de observación desde que es recibida por el planificador hasta que es ejecutada por un telescopio.

Una vez estudiado el planificador de la red GLORIA, el capítulo 5 analiza en detalle el módulo clave en el mismo: el algoritmo de decisión de telescopios. Este capítulo analiza inicialmente el problema multiobjetivo que se pretende optimizar llegando a la conclusión que la elección del telescopio es un punto crucial para su consecución. Así que se definen tres algoritmos de decisión de telescopio distintos que van aumentando en complejidad para intentar mejorar el rendimiento del planificador.

Hasta este punto se ha definido por completo el planificador de la red, tanto su estructura como el algoritmo de decisión, así que el capítulo 6 se dedica al diseño del modelo de la red que permita analizar en detalle el rendimiento de los distintos algoritmos definidos. Este capítulo detalla cada uno de los bloques que componen el modelo.

El capítulo 7 está dedicado a la implantación del planificador en la red GLORIA y a los resultados obtenidos tanto en la red GLORIA como en el entorno de simulación realizado en el capítulo anterior. Como parte de la implantación se detallan todas las tecnologías utilizadas para su despliegue y uso en la red GLORIA. En cuanto a los resultados, se analizan inicialmente los obtenidos directamente de la red GLORIA durante un período de 17 meses. A continuación se muestran las distintas simulaciones realizadas sobre el modelo de la red GLORIA y los resultados obtenidos en las mismas.

Por último, en el capítulo 8 se hace un resumen de los principales resultados obtenidos en la realización de esta tesis contrastándolos con las hipótesis de partida y las contribuciones; y se indica cómo se podría seguir trabajando en esta línea. Así mismo, se incluyen las publicaciones derivadas del trabajo realizado.

En cuanto a los apéndices, el apéndice A está dedicado al diseño UML utilizado en el planificador definido en el capítulo 4. El apéndice B se centra en la lógica difusa, utilizada en el capítulo 5. Por último, el apéndice C explica los modelos de regresión lineal generalizada utilizados tanto en el capítulo 5 como en el 6.

Capítulo 2

Estado del Arte

2.1. Introducción

La robotización de los telescopios ha permitido el control de los mismos de manera remota, no siendo necesaria la presencia de una persona en el mismo observatorio para su manejo. Los controles electro-mecánicos que se utilizan, normalmente proporcionan interfaces software que permiten el control de dichos elementos de manera remota.

Este tipo de observatorios abre un abanico de posibilidades a los astrónomos. Los observatorios pueden estar ubicados en sitios hostiles pero adecuados para las observaciones, tales como la Antártida (Li et al., 2018), el desierto (Riechers et al., 2015) o incluso el espacio (Cackett et al., 2018), pero ser utilizados desde cualquier lugar. Permitiendo de esta manera focalizar los esfuerzos en la ciencia y no en la logística y operación del telescopio.

Añadido al control remoto, la robotización de los telescopios, permite también la automatización de los mismos. Es decir, el control y uso del telescopio sin supervisión directa de una persona. Esto implica no sólo la ejecución autónoma de múltiples observaciones, sino la capacidad de adaptación frente a cambios eventuales que aparezcan durante la ejecución, tales como cambios atmosféricos, alertas astronómicas transitorias, etc.

Esta automatización ha hecho posible la aparición de redes de telescopios orientadas, algunas de ellas para el uso exclusivo profesional, y otras que intentan acercar la astronomía a estudiantes y a la ciudadanía en general, proporcionándoles acceso a al conjunto de telescopios que las componen. Desde el punto de vista científico, existen varias ventajas al unir una serie de telescopios bajo una misma red. La cobertura de las observaciones mejora a lo largo del tiempo, proporcionando en algunos casos la observación continua



en el tiempo. También se mejoran los tiempos de respuesta y la capacidad de seguimiento (Saunders, 2007). Y el hecho de que telescopios con diferentes instrumentos y capacidades se comuniquen reduce el coste del hardware especializado, a la vez que aumenta el rango de ciencia que se puede realizar con el mismo (Naylor et al., 2006).

Muchas de las redes actuales de telescopios tienen como objetivo científico principal la observación de ráfagas de rayos gamma (GRB)¹. Tal es el caso de la red *Skynet*, la red *TAROT* (Télescopes à Action Rapide pour les Objets Transitoires), la red *MASTER* o la red *BOOTES*.

La red de telescopios *Skynet* (Skynet Home, 2019) comenzó en la Universidad de Carolina del Norte en 2004 con la construcción de 6 telescopios en Chile (Reichart et al., 2005). Actualmente, se expande por cuatro continentes y cinco países. Consta de casi veinte telescopios ópticos, con espejos que abarcan desde 35,56 cm a 1 metro de diámetro, así como un radiotelescopio de 20 metros de diámetro. Junto con la observación de GRBs, los telescopios *Skynet* son utilizados por astrónomos y estudiantes para llevar a cabo sus propias investigaciones. Desde el punto de vista educacional, proporcionan programas para institutos (*Skynet Junior Scholar*, 2019) y universidades (*Skynet University*, 2019).

La red de telescopios *TAROT* (Tarot Home, 2019) comenzó a estar operativa en 2006 con dos telescopios autónomos idénticos colocados cada uno en un hemisferio: uno en el Observatorio de La Silla y otro en el Observatorio Calern (Klotz et al., 2013). Posteriormente se unieron a la red un telescopio óptico de 18cm en el Observatorio Les Makes y Zadko, y un telescopio de 1m en Australia (Boër et al., 2017). Aunque el objetivo principal de la misma es el seguimiento de GRBs, se han realizado otras actividades científicas como el descubrimiento de supernovas (Laas-Bourez et al., 2011), o la vigilancia de objetos espaciales y su seguimiento (Boër et al., 2017). Si bien la red ha ofrecido programas para estudiantes, está principalmente dirigida a astrónomos profesionales.

La red *MASTER* (Master, 2019) comenzó en 2010 con 5 telescopios en Rusia. Posteriormente se amplió incluyendo un telescopio en las Islas Canarias (Kornilov et al., 2012) y actualmente la red cuenta con un total de 9 observatorios incluyendo ubicaciones en

¹Explosiones de estrellas supermasivas al final de sus vidas. Los GRBs son tan luminosos que pueden ser observados con telescopios relativamente pequeños, incluso si los GRBs están a miles de millones de años luz de distancia. Sin embargo, la mayoría de los GRBs se desvanecen rápidamente, a menudo durando sólo unos minutos.

las Islas Canarias, Argentina, Sudafrica y Rusia. Cada observatorio cuenta con dos telescopios en paralelo de 40 cm. Junto con su objetivo principal de observación de GRBs, la red pretende resolver una serie de problemas fundamentales: la búsqueda de energía oscura a través del descubrimiento y la fotometría de supernovas, la búsqueda de planetas extrasolares, la detección de pequeños cuerpos en el Sistema Solar y la monitorización de basura espacial (Lipunov et al., 2010).

La red de telescopios BOOTES (Burst Observer and Optical Transient Exploring System) comenzó sus operaciones científicas en 1998 fruto de una colaboración hispano-checa dedicada al estudio de GRBs. El primer observatorio (BOOTES-1), operativo desde 1998, se encuentra en El Arenosillo (Huelva). En 2002 se incluyó una segunda estación, BOOTES-2, ubicada en la Estación Experimental de La Mayora (Málaga). La red se ha ampliado hasta contar con 5 observatorios: BOOTES-3, en Nueva Zelanda; BOOTES-4 en China y BOOTES-5 en México (Castro-Tirado et al., 2012). Actualmente BOOTES-2 incluye un espectrógrafo, un instrumento multimodo que permite al observador cambiar sin problemas entre espectroscopia de baja dispersión y modos de imagen directa durante una observación (Rabaza et al., 2013). La red contribuye al estudio de los estallidos de rayos gamma (GRBs) y al seguimiento y monitorización de fuentes de alta energía de manera simultánea con los satélites espaciales. Por otro lado, la red BOOTES (Abbott et al., 2017) también está siendo utilizada para el análisis de ondas gravitacionales, para la identificación del punto en el que se originó la propagación de estas perturbaciones espacio-tiempo. Este tipo de ondas son identificadas por interferómetros que determinan el área en la que se encuentran las ondas gravitacionales y el objetivo de los telescopios terrestres es el de encontrar en dicha área una contrapartida electromagnética que fuese el origen de la misma.

Adicionalmente, la red BOOTES también realiza observaciones de basura espacial, para detectar y predecir el movimiento de la misma. Y participa en el proyecto PIISA (PIISA, 2019) para introducir la Ciencia y la Investigación en los institutos de secundaria andaluces.

Existen otras redes cuyo objetivo científico es la monitorización de objetos que varían en el tiempo (*time-domain astronomy*). Dentro del abanico de posibilidades que se pueden estudiar, existen una gran tendencia al descubrimiento de exoplanetas y en la obtención

de curvas de luz de supernovas. Redes que se dedican a este tipo de estudios son la red HatSouth y la red LCOGT (Las Cumbres Observatory Global Telescope Network).

La red húngara de telescopios *HatSouth* (HatSouth Home, 2019) está formada por 6 telescopios idénticos extendidos a lo largo de tres localizaciones en el hemisferio norte: el Observatorio Las Campanas en Chile, el Sistema Estereoscópico de Alta Energía (H.E.S.S.) en Namibia y el Observatorio *Siding Spring* en Australia. Estas ubicaciones tienen entre ellas una gran separación longitudinal lo que permite que la red sea capaz de monitorizar posiciones durante las 24 horas del día. Cada ubicación tiene dos telescopios totalmente autónomos controlados por software propietario. Desde sus comienzos en 2009, el principal objetivo científico de la red es descubrir y caracterizar exoplanetas en tránsito (Bakos et al., 2013).

La red de telescopios LCOGT (Las Cumbres Observatory, 2019) fue inicialmente concebida para disponer en cada observatorio de un telescopio de 2 m, sin embargo actualmente consta de 21 telescopios, incluyendo telescopios de 2 m, 1m y 0.4 m, dispuestos en 10 ubicaciones distintas a lo largo del mundo. Junto con el uso profesional de la red: descubrimiento de exoplanetas y análisis de supernovas; LCOGT ofrece actividades educativas y para el público en general. En concreto la red proporciona dos tipos de actividades. Por un lado, da acceso a tiempo de observación en los telescopios de la red a colegios, club astronómicos y organizaciones similares; y por otro, han desarrollado herramientas web y actividades orientadas para que tanto estudiantes como ciudadanos en general puedan participar en el análisis de observaciones que pueden ser utilizadas para llevar a cabo investigaciones científicas (Brown et al., 2013).

Otra tendencia es el uso de las redes de telescopios para la identificación de objetos espaciales, principalmente satélites artificiales y la órbita que describen. Tal es el caso de la red FTN (The Falcon Telescope Network), que actualmente cuenta con 12 observatorios equivalentes localizados en Colorado (Estados Unidos), Chile, Alemania y Australia. Con estas ubicaciones los telescopios situados en Colorado permiten el estudio de objetos en órbita terrestre baja, mientras que las estaciones del resto del mundo permiten el estudio de objetos en órbita más alta, como los que se encuentran en órbitas geosincrónicas (Hope, 2014). Esta red combina el esfuerzo de la *Air Force Academy* y de instituciones educativas. Desde el punto de vista educacional, se pretende despertar el interés en la ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas (STEM: *Science, Technology, Engineering and*

Mathematics) a través de experiencias prácticas. Uno de estos proyectos le da la oportunidad a los estudiantes de decidir cuál será el primer objeto a observar por el observatorio. Para ello deben presentar una propuesta formal en colaboración con el personal científico de la FTN, permitiendo de esta manera que tanto estudiantes como profesorado adquieran experiencia en el desarrollo e implementación de programas científicos (Gresham et al., 2016).

De manera equivalente la red OWL (Optical Wide-field patrol-*N*etwork) tiene como objetivo principal la obtención de información sobre la órbita que describen los satélites coreanos en órbitas terrestres bajas o geosíncronas y mantener sus elementos orbitales (Park et al., 2018). Esta red está formada por 5 telescopios idénticos de 0.5 m ubicados en Mongolia, Marruecos, Israel, Estados Unidos y Corea, y forma parte del programa de la ESA sobre concienciación espacial (*Space Situational Awareness, SSA*) en Corea del Sur desde 2010 (Choi et al., 2018).

Finalmente, también existen redes concebidas con un objetivo puramente educacional. Tal es el caso de la red CESAR (*Cooperation through Education in Science and Astronomy Research*) desarrollada por la Agencia Espacial Europea (ESA), el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) e Ingeniería de Sistemas para la Defensa de España (ISDEFE) (Cuesta and Vaquerizo, 2013). El objetivo principal es involucrar a los estudiantes de secundaria en la astronomía, y en general, en ciencia y tecnología. A través de CESAR los estudiantes, ayudados por sus profesores, tendrán acceso a telescopios, herramientas y a la experiencia de los científicos de la ESA. De esta manera podrán realizar observaciones astronómicas reales, recoger datos científicos y analizar los resultados, siguiendo la misma metodología utilizada por un científico (Pérez-Ayúcar et al., 2018).

En la tabla 2.1 aparece, a modo de resumen y comparativo, las principales características de estas redes: número de telescopios, homogeneidad o no en sus características, objetivo científico y si proporciona o no algún programa no profesional.

2.2. Técnicas de planificación

Para que las redes de telescopios que se han visto en el apartado 2.1, y cualquier otra, sean capaces de ejecutar las observaciones solicitadas, éstas necesitan ser planificadas. El

TABLA 2.1: Características de las redes de telescopios.

	Nº de telescopios	Características telescopios	Objetivo Científico	Otros
Skynet	~20	Heterogénea	GRBs	Educacional
TAROT	4	Heterogénea	GRBs, supernovas, vigilancia espacial	—
Hatsouth	6	Homogénea	Exoplanetas	—
BOOTES	5	Heterogénea	GRBs, ondas gravitacionales, basura espacial	Educacional
MASTER	8	Homogénea	GRBs, objetos no catalogados	—
LCGOT	21	Heterogénea	Exoplanetas, supernovas	Educacional
FTN	12	Homogénea	seguimiento de satélites	Educacional
OWL	5	Homogénea	seguimiento de satélites	Educacional
CESAR	5	Heterogénea	—	Educacional

planificador actúa como un organizador para el observatorio, siendo su principal problema decidir cuándo será ejecutada cada observación. Esta decisión considera, entre otros aspectos, que el tiempo de que se dispone para observar es limitado y que el coste del mismo es elevado. La limitación en tiempo viene dada por varios hechos, por un lado que el tiempo de visibilidad de un objeto suele ser limitado y por otro, la disponibilidad del telescopio. Normalmente existe una gran variedad de proyectos astronómicos que tienen que ser realizados por un mismo telescopio, así que el tiempo operativo del mismo debe ser repartido entre ellos. En cuanto al coste, va asociado al coste elevado en la construcción del telescopio y al mantenimiento del mismo.

De esta manera, el principal objetivo de un planificador, ya sea de un telescopio aislado o de una red de telescopios, es la asignación de observaciones optimizando los distintos objetivos que se hayan marcado y satisfaciendo una serie de restricciones. Estas restricciones pueden ser de dos tipos: las que necesariamente tienen que ser satisfechas y las que indican una preferencia frente a varias posibles soluciones.

Desde el punto de vista de la optimización, este problema clásico de asignación de tareas es conocido como *job-shop problem* (JSP), donde N tareas ideales se asignan a M recursos idénticos. Un problema de mayor complejidad, llamado Flexible-JSP (FJSP), surge

cuando las tareas pueden ser ejecutadas por diferentes recursos, en este caso, distintos telescopios (Colome et al., 2012).

El número y tipo de objetivos a optimizar en la asignación es variable y depende del planificador concreto utilizado en cada telescopio o red de telescopios. Lo más común es optimizar dos objetivos, siendo los más utilizados la maximización del tiempo de uso de los telescopios y el retorno científico obtenido con los resultados, tal y como ocurre en el telescopio ALMA (Solar et al., 2016) o en el array de telescopios CTA (Colomé et al., 2014). En cuanto al retorno científico cada entidad decide como evaluarlo. El telescopio ALMA, formado por 66 antenas repartidas a distancias de hasta 16 km, estudia la luz de algunos de los objetos más fríos del universo y mide el retorno científico en términos del número de propuestas finalizadas según su prioridad. Sin embargo, la red CTA, diseñada para la detección de rayos gamma, también tiene en cuenta el ángulo cenital máximo, el tiempo operativo asignado a la ejecución de las tareas científicas y el tiempo mínimo invertido en el desplazamiento de la montura. También existen objetivos más específicos y relacionados directamente con el objetivo final del telescopio o red de telescopios. En el caso del telescopio LSST (*Large Synoptic Survey Telescope*) que realiza reconocimientos del cielo visible, las funciones de optimización son maximizar la eficiencia del tiempo de recopilación de datos y la eficiencia de las misiones de reconocimiento (Sebag et al., 2007). La red de telescopios LCOGT tiene como objetivo maximizar la suma de las prioridades, asignadas por los usuarios, de las observaciones planificadas (Lampoudi et al., 2015). Mientras que en CARMENES (*Calar Alto high-Resolution search for M dwarfs with Exo-earths with Near-infrared and optical Echelle Spectrographs*), un telescopio para la búsqueda de planetas alrededor de estrellas de muy baja masa, los objetivos son minimizar el tiempo en el que el telescopio no está adquiriendo datos científicos y minimizar la desviación entre el número de veces que se han observado todos los objetos de la misma prioridad en un sondeo completo (Garcia-Piquer et al., 2014).

Por último también hay ejemplos de casos de optimización con un número más elevado de objetivos. Tal es el caso del algoritmo propuesto por Moser and van Straten (2018) en el que se minimizan los períodos de inactividad y se maximizan tanto la calidad de los datos obtenidos como el tiempo asignado a observaciones. O el caso de Chandra, uno de los más importantes telescopios espaciales operados por la NASA, en el que se planifica

atendiendo a los siguientes cuatro objetivos: minimizar el riesgo del telescopio y el consumo de energía del mismo y maximizar el número de objetivos científicos conseguidos y el tiempo de observación (Bucher et al., 2008).

Como se ha visto, el número de objetivos a optimizar es siempre superior a uno, por lo que se presenta un problema de optimización multiobjetivo en el que hay que encontrar una solución que represente el valor óptimo de los distintos objetivos. Sin embargo, normalmente no existe una solución que optimice a todos y cada uno de los objetivos, ya que aparecen conflictos entre ellos. Es decir, la mejora de uno de ellos puede acarrear el empeoramiento de otro. Debido a esto, en este tipo de problemas se suele llegar a una situación de compromiso en la que todos los objetivos se satisfacen en cierto grado.

En el caso de la planificación de observaciones en telescopios, este tipo de problema suele ser abordado con distintos ciclos temporales de planificación. El planificador generalmente considera condiciones variables de largo a corto plazo para optimizar la priorización de las observaciones de entre las que quedan pendientes. La mayoría de las soluciones existentes, como el planificador de la red ALMA (Solar et al., 2016), el de la red CTA (Colomé et al., 2014), o el del telescopio espacial JWST (Giuliano et al., 2011), utilizan dos ciclos de planificación, uno de período largo y otro de período corto. Existe también la posibilidad de incluir un ciclo de período intermedio como ocurre en CARMENES (García-Piquer et al., 2014).

El planificador de período largo proporciona la planificación asociada a una temporada (meses). El intermedio considera situaciones que pueden tener un impacto en una escala temporal intermedia. Suele llevar a cabo una preselección de tareas que reduce la muestra de objetos que tienen que ser programados por el planificador a corto plazo. Este último adapta las observaciones seleccionadas a las condiciones variables, que se pueden dar en el observatorio, casi en tiempo real. Esta variación puede estar asociada a la llegada de un nuevo objeto para observar, a un cambio en el estado del telescopio, a la calidad o a la relación señal a ruido (SNR) de los datos recogidos, a la meteorología, etc. La planificación a largo y medio plazo se realiza de manera off-line y se centra principalmente en los procesos de filtrado, predicción y simulación. La planificación a corto plazo, por otro lado, es comúnmente ejecutada en línea y toma en cuenta aquellas condiciones que cambian dinámicamente, por ejemplo el clima (Colome et al., 2012).



El CTA (*Cherenkov Telescope Array*) es un proyecto en curso para construir un observatorio de astronomía para rayos gamma de muy alta energía compuesto de dos arrays de telescopios ubicados en el hemisferio norte y en el hemisferio sur (Bigongiari and Consortium, 2016). Su planificador, tiene por objetivo asignar las observaciones a un único array o a múltiples sub-arrays de telescopios. Utiliza dos ciclos de planificación: uno on-line y otro off-line. El primero obtiene un conjunto de observaciones a realizar en un período de tiempo según las restricciones del CTA que se pueden calcular de antemano, mientras que el segundo se dedica a programar observaciones en tiempo casi real y considerando la perspectiva a largo plazo junto con las impredecibles condiciones cambiantes. Se consideran entonces dos tipos diferentes de planificación: la larga (LTP, *Long Term Planner*) para programar observaciones de manera off-line para una temporada completa (es decir, seis meses); y una combinación de la larga y la corta (STP, *Short Term Planner*), que son adecuadas para crear programaciones para una noche en casi tiempo real. Ambos, LTP y STP, se basan en redes neuronales estocásticas GDS (*Guarded Discrete Stochastic*) y en técnicas de propagación de restricciones.

La figura 2.1 muestra el diagrama de actividad del planificador. El primer proceso (1) corresponde al cálculo off-line del LTP, que proporciona un conjunto de soluciones basadas en diferentes objetivos. Una de las soluciones obtenidas es seleccionada por el equipo de planificación del observatorio a cargo y se utiliza como referencia para dirigir el planificador on-line. Este proceso sólo es necesario al comienzo de la temporada de funcionamiento del observatorio, aunque puede llevarse a cabo en cualquier momento para introducir correcciones en el plan inicial. El procedimiento en línea (2) calcula diariamente la planificación a largo plazo utilizando el mismo algoritmo que en el proceso (1) y considerando las tareas ya ejecutadas y el estado de las propuestas pendientes. La solución preferida a largo plazo se selecciona teniendo en cuenta la configuración dada por el proceso fuera de línea (1). Esta solución es después actualizada por el STP que tiene en cuenta las condiciones cambiantes que puedan aparecer y crea de este modo planificaciones en tiempo casi real. Los objetivos programados por el LTP para la noche siguiente son considerados como los más prioritarios por el STP (Colomé et al., 2014). La principal diferencia entre ambos algoritmos es que el STP puede tratar eventos durante el proceso de cálculo de nuevas programaciones. Estos eventos son útiles para avisar al planificador

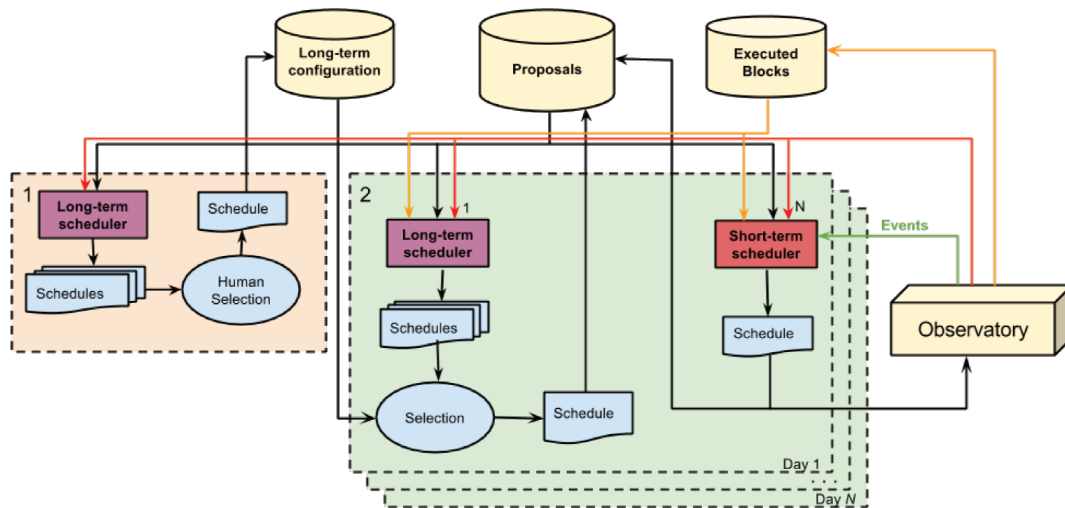


FIGURA 2.1: Diagrama de actividad del planificador de CTA (Colomé et al., 2014)

cuando se produce un cambio importante, como la activación/desactivación de un sub-array, las condiciones meteorológicas o el estado actual de un bloque programado que se está ejecutando.

El ciclo largo se divide en dos fases. En primer lugar hay un proceso de inicialización de la red neuronal atendiendo a las observaciones pendientes y al número de sub-arrays que se van a utilizar. En esta fase se definen los períodos de oscuridad (sol y luna por debajo del horizonte) y de semioscuridad (sol por debajo del horizonte y luna por encima) y se definen todas las restricciones y prioridades que debe cumplir el planificador. La siguiente fase consiste en un proceso iterativo cuyo resultado es la planificación en sí. Esta planificación es posteriormente modificada para satisfacer todas las restricciones establecidas. El planificador de ciclo corto se ocupa de los eventos que aparecen antes y/o durante de la ejecución de la planificación, modificando la red neuronal en consecuencia (Colomé et al., 2014).

El planificador de la red ALMA (*Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array*), se basa en un planificador de doble ciclo. La primera fase de planificación se corresponde con el planificador de ciclo largo, en el que cada unidad básica que puede ser ejecutada en un telescopio (*Scheduling Block, SB*) es organizada en los intervalos de tiempo largo que maneja este planificador (*Long Term Slot, LTS*). Estos intervalos de tiempo largo se construyen mediante una discretización de todo el tiempo de la temporada, tratando de establecer un

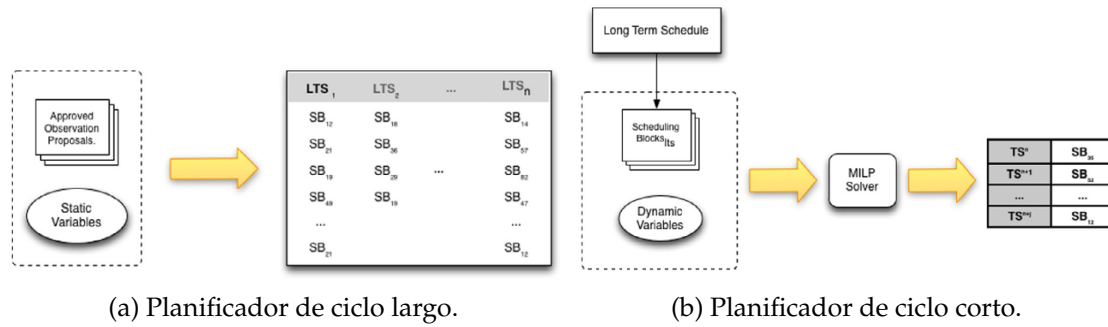


FIGURA 2.2: Esquema del planificador de dos ciclos de ALMA (Solar et al., 2016)

lapso de tiempo apropiado en el cual los SBs, considerando solamente variables estáticas, puedan ser ejecutados en el telescopio (Fig. 2.2a).

La segunda fase de planificación se corresponde con un planificador de ciclo corto. Las observaciones viables que ya estaban organizadas en la fase de largo plazo se introducen en una nueva fase de programación en la que se consideran ahora restricciones dinámicas. Las restricciones dinámicas causan que el problema cambie y por lo tanto, requieren una reprogramación para volver a calcular una nueva planificación adecuada que considere las condiciones actualizadas. Las restricciones dinámicas que se consideran en este planificador son: condiciones meteorológicas, la precedencia de un SB con respecto a otro y el porcentaje de observaciones completadas asociadas a un mismo proyecto. Esta planificación es un problema de satisfacción de restricciones que se modela matemáticamente como un algoritmo de programación lineal en enteros mixta (MILP) en el que se formulan matemáticamente tanto los parámetros de entrada al planificador como las funciones objetivo que se pretenden optimizar (Fig. 2.2b). Este problema MILP es resuelto a través de IBM ILOG (IBM ILOG CPLEX, 2019), un software multipropósito de alto rendimiento que utiliza técnicas avanzadas para resolver este tipo de problemas (Solar et al., 2016).

El planificador propuesto ha sido evaluado en simulación. Los casos probados revelan que el planificador logra un rendimiento aceptable tanto en la asignación de tiempo como en la diferencia relativa entre el valor de función objetivo calculado y el valor óptimo. Pudiéndose esto último reducir cambiando el valor de ciertos parámetros.

El planificador del JWST se basa en técnicas heurísticas que minimizan el momento angular del satélite en el que está alojado el telescopio. Este planificador permite planificaciones multiobjetivo que reducen el momento sin sacrificar la eficiencia del satélite.

Las técnicas heurísticas funcionan proporcionando observaciones candidatas que permiten balancear el momento entre unas observaciones y otras. Este proceso se divide en un ciclo largo y un ciclo corto. En el primero se asignan observaciones para una ventana temporal de unos 60 días; mientras que en el segundo se replanifica una ventana de unos 22 días (Giuliano et al., 2011).

CAST, el planificador de CARMENES, incluye un ciclo intermedio adicional. Los planificadores de largo y medio ciclo, planifican las observaciones dentro de un intervalo de tiempo atendiendo a las restricciones fijas establecidas. Estos planificadores se basan en algoritmos genéticos que comienzan con un conjunto de soluciones iniciales que se mejoran a través de un ciclo iterativo basado en evaluarlas, seleccionarlas, recombinarlas y mutarlas. A continuación, el planificador de ciclo corto tiene en cuenta todas las limitaciones y adapta el plan generado por el planificador de medio ciclo. Calcula la siguiente observación que se ejecutará durante la noche reaccionando frente a circunstancias inmediatas. Este planificador se basa en técnicas heurísticas (García-Piquer et al., 2017).

También existen ejemplos de planificadores con un único ciclo de planificación, tal es el caso de la red LCOGT (Las Cumbres Observatory, 2019), el sistema experto de ARTEMiS (Dominik et al., 2008) o el propuesto por Hinze and Fiedler (2016).

El planificador de la red LCOGT tiene como objetivo asignar a un subconjunto, de todas las observaciones recibidas, el tiempo de comienzo y el telescopio que ejecutará cada una de dichas observaciones. La resolución de este problema se hace de manera off-line y se basa en un modelado del mismo como programación lineal de enteros. Dicho modelo, inicialmente discretiza el tiempo en slots que pueden ser de distinta duración. Cada slot está definido por el telescopio al que corresponde y una tupla (hora de inicio, duración) o (hora de inicio, hora de fin). A continuación, las restricciones que no se superponen se modelan como inecuaciones. Por otro lado, variables booleanas son utilizadas para seleccionar entre las posibles franjas horarias de inicio para cada observación, y finalmente se maximiza la suma de las prioridades de las observaciones programadas (Lampoudi et al., 2015). Para la resolución de este problema se utiliza un software comercial para programación lineal, el optimizador Gurobi (Gurobi Optimizer, 2019).

El planificador ofrece la posibilidad de recibir peticiones de alta prioridad para observar tránsitos y otros fenómenos efímeros. A este tipo de peticiones se le concede una ruta prioritaria para pasar rápidamente hasta el telescopio que finalmente la ejecute. Este

tipo de peticiones pueden anular las observaciones anteriores de menor prioridad, que se reanudarán una vez finalice ésta (Martone et al., 2019). Junto con este mecanismo de entrada, se ha desarrollado un proceso automático que recibe las notificaciones de GRBs a través de la *Gamma-ray burst Circular Network*, GCN. Esta red distribuye las localizaciones de los GRBs y otros fenómenos que han sido detectados a través de un conjunto de satélites (GCN, 2019).

ARTEMiS es un sistema experto para la detección de exoplanetas cuyo planificador se basa en buscar el espacio de todas las posibles soluciones hasta que se encuentra una solución adecuada. Utiliza algoritmos de búsqueda local en el que inicialmente se busca una solución utilizando el algoritmo Greedy y a partir de éste se van buscando soluciones locales que vayan optimizando la planificación (Wetter et al., 2015).

Por último, Hinze and Fiedler (2016) proponen un algoritmo genético para la planificación de observaciones para una red de telescopios ópticos encargada de catalogar basura espacial. Como parámetro de optimización en el planificador se ha utilizado la órbita que describen dichos objetos. Los resultados en simulación muestran que todos los objetos fueron planificados y que el algoritmo converge hacia el óptimo.

Todas las técnicas de planificación que se han mostrado hasta ahora, independientemente del tipo que sean, siguen un esquema de planificación basado en crear una batería de observaciones para un período de tiempo determinado. La elección del orden de las observaciones, como se ha visto, es un problema de optimización que puede ser resuelto de diversas formas: algoritmos genéticos (Sosnowska et al., 2014), programación lineal en enteros mixta (Solar et al., 2016), etc. Sin embargo, éste no es el único método propuesto de planificación. Existe otra tendencia que se basa en puntuar todas las observaciones pendientes en cada instante de ejecución. Esta puntuación se realiza siguiendo una métrica determinada que normalmente depende de las restricciones especificadas en la petición de observación (Delgado and Reuter, 2016; Moser and van Straten, 2018). De manera que la siguiente observación a ejecutar es la que ha obtenido la mejor puntuación.

El planificador del LSST (*Large Synoptic Survey Telescope*), teniendo en cuenta el estado interno del observatorio y las condiciones ambientales externas, obtiene una lista ordenada de observaciones. Este proceso se repite cada vez que se tiene que determinar el siguiente objeto a observar, adaptándose el listado en cada iteración. Esta lista es priorizada utilizando una función de coste que tiene en cuenta las restricciones de cada

observación y el tiempo de desplazamiento en la montura del telescopio (Delgado and Reuter, 2016).

Por otro lado, Moser and van Straten (2018) proponen tres algoritmos diferentes para la planificación en radio telescopios en el que la siguiente observación es preseleccionada antes de que la actual termine. De esta manera se minimiza la principal desventaja de este tipo de planificación que es la espera hasta obtener el siguiente objeto a observar. El primer algoritmo se basa en eliminar aquellos objetos que no están en las cercanías de la actual posición del telescopio. El segundo algoritmo parte de la información obtenida en el anterior y elige el objeto a observar de manera que el tiempo de movimiento de la montura se minimice. Por último, otro algoritmo implementado decide el siguiente objeto dependiendo del tiempo que le quede de visibilidad desde el observatorio en el que se encuentra el telescopio.

Independientemente de las técnicas de planificación utilizadas, el planificador puede estar distribuido por la red o bien centralizado. En redes distribuidas (Racero et al., 2015), normalmente aparece un nodo central que realiza una planificación para cada uno de los telescopios de la red para un período de tiempo determinado, normalmente una noche. Esta planificación es enviada a los telescopios quienes tienen un planificador propio que es capaz de replanificar atendiendo a eventos que puedan ocurrir en el observatorio, tales como fenómenos atmosféricos. Por otro lado, en redes centralizadas (Saunders et al., 2014) el nodo central planifica y los telescopios actúan como meros secuenciadores sin capacidad de decisión alguna. Los eventos, como los fenómenos atmosféricos o los problemas en el telescopio, son gestionados directamente por el nodo central provocando una nueva planificación de la red.

2.3. Simulación de telescopios y redes de telescopios

Como se ha visto, existen dos tendencias a la hora de desarrollar instalaciones astronómicas: las redes de telescopios y telescopios aislados. Esta última se basa en la construcción de grandes telescopios que permitan observar objetos débiles. De esta manera, telescopios como el *Large Synoptic Survey Telescope* (LSST) o el de 3 m del observatorio de Calar Alto (CAHA) son ejemplos de la segunda tendencia. El primero será un telescopio de 8 metros, que se espera que haga contribuciones significativas al inventario del

Sistema Solar (Juric et al., 2017); por su parte, el último ha iniciado un estudio en busca de exoplanetas terrestres gracias a la utilización del espectrógrafo CARMENES (Quirrenbach et al., 2016).

Ambos tipos de instalaciones astronómicas, telescopios aislados y redes de telescopios, conllevan una gran complejidad debido a los múltiples requisitos técnicos que deben cumplirse. Además, estos sistemas tienen que funcionar de forma autónoma durante un largo período de tiempo, lo que hace obligatorio el análisis de la eficiencia y el rendimiento de todo el sistema o de parte del mismo. Para realizar este análisis, se utilizan habitualmente herramientas de simulación.

En las redes de telescopios, se suele analizar el comportamiento de un telescopio completo dentro de la red con diferentes propósitos. Giakoumidis et al. (2013) proponían una red y una serie de simulaciones para analizar la interacción entre los distintos componentes de la red (telescopios, ordenadores, seres humanos) en una amplia gama de actividades tales como sondeos, monitorización, etc. El simulador se basa en código abierto existente. *Stellarium* se utiliza para simular el movimiento del telescopio y conocer hacia donde está apuntando el telescopio. La imagen simulada se genera mediante el procesamiento de una original del Digital Sky Survey (DSS) que se procesa a través de MATLAB para simular los efectos atmosféricos y las condiciones del cielo. El planificador gestiona las observaciones dinámicamente y selecciona al telescopio adecuado para maximizar la eficiencia y la calidad de los datos de la red. Este planificador es el mismo que se utilizará con los telescopios reales, tal y como aparece en la figura 2.3, tiene capacidad para comunicarse con los telescopios reales y los simulados. De igual forma, el SW asociado a los telescopios será el mismo para ambos casos.

La CTA, aunque no está finalizada, ha llevado a cabo simulaciones para estudiar el rendimiento esperado y las capacidades científicas de las diferentes configuraciones de telescopios. Estas simulaciones se han basado en el método de Montecarlo² y se dividieron en dos partes. La primera es la simulación de cascadas atmosféricas extensas y la radiación de Cherenkov; y la segunda es la simulación del telescopio, incluyendo óptica, foto-sensores y electrónica (Di Pierro et al., 2016).

²Las simulaciones de Montecarlo se utilizan para modelar la probabilidad de diferentes resultados en un proceso que no puede predecirse fácilmente debido a la intervención de variables aleatorias. Es una técnica utilizada para entender el impacto del riesgo y la incertidumbre en los modelos de predicción y pronóstico.

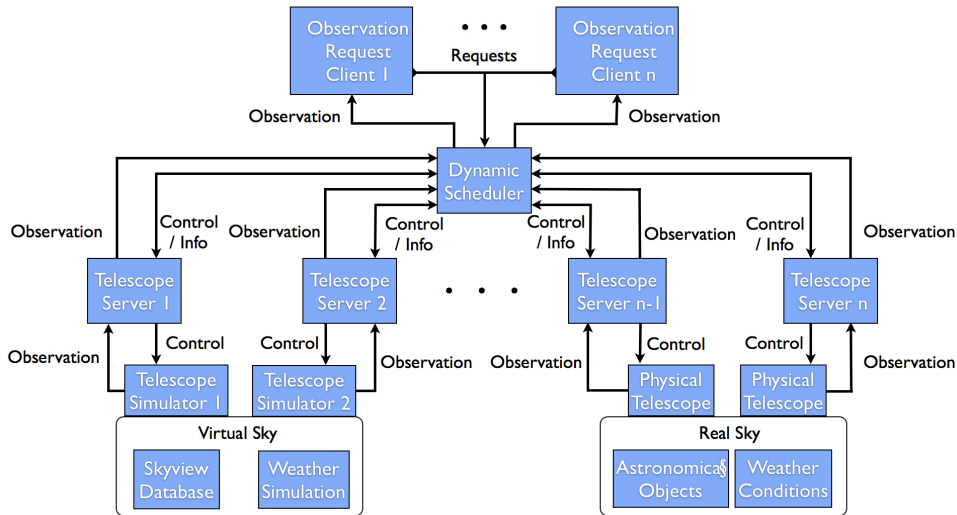


FIGURA 2.3: Arquitectura de la red de telescopios propuesta por Giakoumidis et al. (2012).

Por último, en la red FTN se realizaron varias simulaciones antes de incluir un sistema de óptica adaptativa en uno de sus telescopios para estudiar su rendimiento. Las simulaciones se basaron en el método Montecarlo y permitieron optimizar el diseño de la óptica para mejorar las imágenes tomadas en el telescopio (Cegarra Polo and Lambert, 2016).

También es habitual simular el rendimiento de una red o parte de ella antes de utilizarla para un nuevo objetivo científico. Ese es el caso de la red FTN cuando se iba a utilizar para detectar, rastrear y caracterizar objetos espaciales. Esta red va a hacer observaciones simultáneas del mismo objetivo desde múltiples sitios. Para analizar el uso óptimo de la red para este propósito, se han llevado a cabo simulaciones de observaciones de objetivos, en concreto satélites geostacionarios, desde sitios individuales y múltiples. Para ello se tuvo que modelar este tipo de objetos de una manera estadística y el brillo de la luz reflejada por los mismos (Hope, 2014).

Otro ejemplo aparece en la red LCOGT, donde está previsto instalar espectrógrafos en hasta 6 observatorios para emular un único espectrógrafo distribuido globalmente. Antes de instalarlos, se han realizado simulaciones para analizar la precisión de esta subred (Eastman et al., 2014).

Junto con las simulaciones que se han descrito, existe una tendencia general tanto para redes de telescopios como para telescopios individuales de realizar simulaciones del planificador que gestiona las peticiones recibidas. Este tipo de simulaciones conlleva el

modelado de ciertos parámetros que han de utilizarse en el planificador. En el caso de las simulaciones para estimar la eficiencia del planificador asociado al espectrógrafo CARMENES (Quirrenbach et al., 2016), se modeló el tiempo atmosférico teniendo en cuenta datos reales del observatorio y la influencia de las estaciones en el mismo. Así mismo, para simular escenarios planetarios para la detección de exoplanetas se tuvieron que modelar ciertos parámetros de los mismos como la distribución de su masa, el índice de planetas o el período orbital de los mismos. Las simulaciones han probado que el planificador diseñado optimiza el uso del telescopio y que en presencia sólo del ruido originado por la instrumentación se supera el umbral de detección (García-Piquer et al., 2017).

Para el caso del planificador de LSST se ha desarrollado un entorno de simulación que se basa en tres componentes principalmente: un simulador de catálogo (CatSim) capaz de devolver catálogos de fuentes astrofísicas (por ejemplo, estrellas, galaxias y objetos del sistema solar) con propiedades y características de ruido que son representativas de lo que el telescopio observará; un simulador de imagen (Phosim) capaz de devolver imágenes con características coherentes con el diseño del LSST (por ejemplo con distribuciones astrométricas, fotométricas y de elipticidad que son apropiadas para un telescopio de exposición larga de gran tamaño y campo amplio); y un simulador de estrategia de observación (OpSim) que puede generar secuencias de observaciones LSST (y sus estadísticas resumidas) que cumplan con las cadencias y profundidades de 10 años requeridas por el tipo de estudios que realiza el telescopio. Aisladamente, cada uno de estos componentes de simulación proporciona una amplia gama de capacidades; desde la generación de las propiedades estadísticas de un año de observaciones hasta simulaciones específicas de estrellas para evaluar cómo la función de dispersión de puntos puede ser interpolada a través de un sensor. Juntos, los componentes de simulación permiten simulaciones de extremo a extremo que pueden rastrear las propiedades del sistema LSST desde la cosmología subyacente hasta los productos de datos derivados (Connolly et al., 2014).

La figura 2.4 muestra un esquema de las herramientas disponibles y utilizadas dentro del LSST para modelado y simulaciones. Las cajas naranjas representan un modelo del universo LSST que comprende estrellas, galaxias y objetos del sistema solar. Las cajas verdes representan herramientas individuales de simulación de la ciencia, cada una con diferentes niveles de fidelidad y complejidad. Las casillas marrones representan los

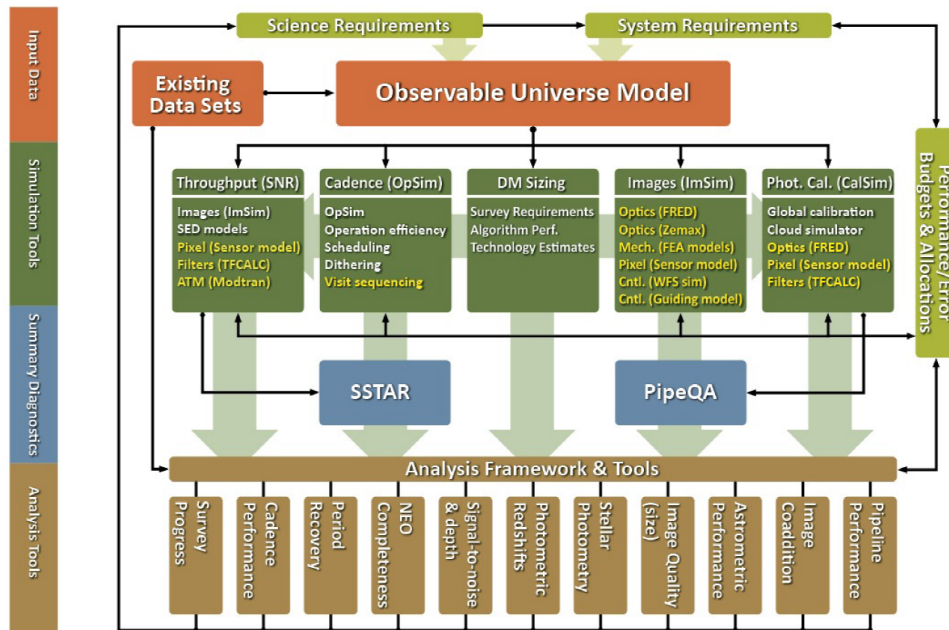


FIGURA 2.4: Esquema de las herramientas de simulación del LSST (Connolly et al., 2014).

tipos de investigaciones que pueden realizarse combinando las herramientas de simulación individuales. Los elementos resaltados en amarillo corresponden a herramientas de ingeniería (por ejemplo, ZEMAX) que se utilizan para validar la fidelidad de las simulaciones científicas (Connolly et al., 2014).

La red CTA también ha simulado el comportamiento del planificador de observaciones y del software de control de los arrays de telescopios. El simulador modela el observatorio y las condiciones del sistema (es decir, operatividad, tiempo atmosférico, etc.) para reproducir adecuadamente la programación real y las cadencias de observación. También se consideran objetivos múltiples. Este marco de trabajo ayudará a analizar los beneficios que proporciona el planificador y las acciones correctivas necesarias si no se logra el rendimiento esperado (Colomé et al., 2014).

Se ha definido una muestra de propuestas científicas que se ha utilizado para realizar pruebas de rendimiento y realizar el análisis con el fin de extraer conclusiones no sesgadas. Los resultados obtenidos muestran que los calendarios obtenidos cumplen con las limitaciones definidas, optimizan el rendimiento científico y pueden reaccionar ante situaciones inesperadas en menos de un segundo (Colomé et al., 2014).

Por último, Saunders (2007) realiza la simulación del planificador de red que propone diseñando un entorno de simulación. Éste proporciona una red de telescopios virtuales



FIGURA 2.5: Localización geográfica de los telescopios de la red GLORIA.

que replicará lo más fielmente posible las condiciones reales de operación bajo las cuales el planificador debe operar. Los telescopios virtuales se han modelado de manera que sean equivalentes a los existentes en la red eStar (Steele et al., 2002).

2.4. El proyecto GLORIA

El proyecto europeo GLORIA (GLObal Robotic telescope Intelligent Array) perteneciente al programa marco FP7/2007-2012 (Castro-Tirado et al., 2014), se puso en marcha a finales de 2014 con la idea de crear una red de telescopios global donde los usuarios pudieran investigar en astronomía realizando observaciones y/o analizando información que otros usuarios hubieran adquirido. Esta red integra telescopios que actualmente están trabajando en diversos campos científicos, creándose de este modo una red heterogénea, con la particularidad de que los telescopios comparten el tiempo de operación entre sus propietarios y la red GLORIA.

Esta red integra 18 telescopios extendidos a lo largo de cuatro continentes y ubicados en ambos hemisferios (Fig. 2.5). Este conjunto de telescopios incluye tanto telescopios solares como nocturnos, con distintas características ópticas (Tabla 2.2).

El objetivo de esta red es atraer a un gran número de usuarios hacia el campo de la astronomía, de manera que “cuantos más ojos miren hacia el cielo, más y mayores descubrimientos se lograrán”. Gracias a lo que se conoce como *e-science* o ciencia ciudadana, toda la información generada por esta red, se podría compartir y analizar por los usuarios de la misma, acelerando así posibles descubrimientos astronómicos.

TABLA 2.2: Características de los telescopios de la red GLORIA.

Telescopio	Apertura (m)	Dist. focal (mm)
BOOTES-1	0.3	1775
BOOTES-2	0.6	4475
BOOTES-3	0.6	4475
CAB-CEB	0.5	5000
CAB-CAHA	0.5	5000
BART	0.25	1640
FRAM	0.3	3048
Pi of the Sky 1	0.07	85
Pi of the Sky 2	0.07	85
WATCHER	0.4	5881
CATA 500	0.5	
OM (solar)	0.25	2500
TADs (solar)	0.25	3020
TADn	0.25	3020
D50	0.5	1975
FAVOR	0.15	1800
TORTORA	0.07	85
REM	0.6	4475

La red GLORIA está disponible para todos los ciudadanos en general, incluyendo astrónomos profesionales y amateurs, poniendo a su disposición los telescopios y datos obtenidos de la misma. En el caso de astrónomos profesionales, GLORIA puede ser de gran utilidad para aquéllos que no disponen de instalaciones astronómicas a su alcance. Además, permite darles acceso a telescopios en ubicaciones remotas en las que podrían observar objetos no visibles desde su localización. En cuanto a astrónomos amateurs, GLORIA posibilita el acceso a telescopios profesionales a usuarios que normalmente no tendrían acceso a éstos.

Para conseguir este objetivo, se desarrollaron dos tipos diferentes de experimentos. Por un lado, experimentos del tipo *on-line*, en los que se emplea un telescopio para llevar a cabo una observación, y por otro los experimentos denominados *off-line*, en los que se emplea información previamente obtenida por la red. El primero de los experimentos *off-line*, denominado *Personal Space*, permite contemplar el cielo tal cual era en una fecha y ubicación determinada. Para esto, la red empleó otras fuentes de imágenes astronómicas. El segundo experimento, denominado *Actividad Solar* permite analizar las manchas solares y el cálculo del número de Wolf mediante la valoración de éste por parte de los

usuarios. Por último, el experimento denominado *Estrellas variables* permite analizar la curva de luz de las estrellas e identificar estrellas variables, es decir, estrellas que experimentan una variación en su brillo o fluctúan con el transcurso del tiempo.

En cuanto a los experimentos *on-line*, éstos se dividen en dos categorías: interactivos y planificados (*batch*). Los primeros permiten teleoperar directamente un telescopio por parte de los usuarios. Para ello, éstos deben reservar un telescopio desde el portal web de la red. Una vez que se accede a él, el usuario tendrá el control de todos los elementos del mismo en tiempo real: podrá mover la montura a unas coordenadas u objeto específico, cambiar los filtros, enfocar, seleccionar el tiempo de exposición y tomar una imagen. La información de la estación meteorológica, así como la transmisión de la webcam del observatorio también están disponibles.

Por otro lado, el experimento planificado, cuya interfaz web aparece en la figura 2.6, consiste en realizar una petición de observación a la red con una serie de parámetros concretos, y que ésta la realice automáticamente. Los parámetros de la observación incluyen tanto un bloque de instrucciones como un apartado de restricciones. El primero contiene toda la información necesaria para que se pueda ejecutar la observación: el objeto a observar, definido a través de sus coordenadas RADEC o su nombre, el filtro a utilizar y el tiempo de exposición de la observación.

Una vez enviada la petición de observación, la red GLORIA, a través de un planificador central, deberá decidir a qué telescopio enviar la observación. Una vez realizada ésta, el usuario podrá ver el resultado a través de la página web de GLORIA. Si la observación se ha completado adecuadamente podrá descargar la imagen obtenida y puntuar la calidad de la misma. Estas puntuaciones van directamente asociadas al telescopio que ha realizado la observación, manteniéndose siempre una puntuación del mismo consistente en la media de las puntuaciones emitidas por los usuarios.

El objeto de esta tesis es el experimento planificado que se acaba de presentar. El planificador central que gestiona todas las peticiones recibidas es el que se ha desarrollado en esta tesis y se presenta en el capítulo 4. Éste ha sido integrado dentro de los experimentos disponibles en la web de GLORIA, en concreto en el experimento planificado, permitiendo de esta manera su uso por parte de los usuarios de la red.

The screenshot displays the 'GLORIA Batch Experiment' web interface. At the top, there is a navigation bar with 'Home' and 'Observing plans' links, and a 'Request an observation' section. Below this, a form is presented with the following sections:

- 1. Select one of the next objects or write down its name:** A grid of object thumbnails including M1 (Orion nebula), M8 (Lagoon nebula), NGC891 (Spiral galaxy), M45 (Pleades), NGC1499 (California nebula), Jupiter (Planet), M31 (Andromeda), and NGC278 (Spiral galaxy). The 'M31' option is selected.
- 2. Constraints:** A section for setting observation parameters. It includes a 'Filters' dropdown set to 'OPEN', 'Exposition' radio buttons for 'Exposition Time' and 'Magnitude + SNR', an 'Exposition Time' input field set to '0,15', 'Expositions number' set to '1', 'Moon Distance' and 'Moon Altitude' inputs set to '18' and '90' degrees respectively, and 'Object Altitude' radio buttons for 'Object Altitude' and 'Airmass'. There are 'Show' and 'Hide' buttons for 'Advanced Options'.
- Advanced Options:** A light blue panel containing:
 - 'Not before date' and 'Not after date' inputs with ISO date-time format.
 - 'Days from New Moon' input set to '1 - 28'.
 - 'Seeing' input set to 'MAX (0,5 - 6) arcsec'.
 - 'FoV' input set to 'MAX (1 - 900) arcmin'.
 - 'Preferred Telescopes' dropdown menu with options: BOOTESIA, SIRT, CATASO, and MMT.
 - A note: 'Mantenga pulsada la tecla Ctrl para seleccionar varios telescopios'.
- 3. Confirm your observation:** A section with a 'Confirm' button and a note: 'With this confirmation, you are asking GLORIA to find a telescope to take a picture for you; if no telescope can get your picture within 3 days, the plan will be discarded.'
- ACKNOWLEDGMENTS AND DISCLAIMER:** Text regarding funding by the European Union Seventh Framework Programme (FP7/2007-2012) and a disclaimer.
- AUTHORS AND LICENSES:** Text about the GLORIA team and licensing (Creative Commons Attribution 3.0 Unported License).
- PARTNERS OF THE PROJECT:** A row of logos for various partner institutions.

FIGURA 2.6: Interfaz web del experimento planificado de la red GLORIA en el que se muestran todos los parámetros que puede completar el usuario.

2.5. Conclusiones

A lo largo de este capítulo se ha visto como existe gran cantidad de redes de telescopios, siendo algunas de ellas de uso exclusivamente profesional, e incluyendo otras programas educacionales para acercar la astronomía a los estudiantes. Estas redes incluyen un planificador que se encarga de gestionar las peticiones de observación que son realizadas. Aunque el problema de planificación en todas ellas se considera un problema de optimización multiobjetivo, se han mostrado las distintas técnicas que han sido utilizadas para resolverlo, tanto en redes de telescopios como en telescopios aislados. Se han visto soluciones basadas en redes neuronales estocásticas, en programación lineal de enteros mixta, en técnicas heurísticas, etc.

Todas estas técnicas de planificación que se han presentado en el apartado tienen en común que el planificador tiene control sobre el tiempo de ejecución de las observaciones en los telescopios. En estas redes los telescopios que las componen se emplean de manera exclusiva por la red, y son gestionados a través del mismo sistema de control. Sin embargo, uno de los puntos clave de la red GLORIA es que el uso del telescopio es compartido entre la red y el propietario del mismo. La idea es que los propietarios puedan ceder un porcentaje de tiempo del telescopio a la red. Esta coexistencia privada y pública hace que el sistema de control y planificación, que normalmente será diferente para cada telescopio, no se pueda modificar. Este hecho hace que la red GLORIA sea heterogénea, no sólo porque los telescopios tienen diferentes características (Tabla 2.2), sino porque también existen distintos sistemas de control y planificación para su gestión: RTS2 (Kubánek, 2016), ACP (Denny, 2011), etc. Además, para combinar la existencia de un planificador de red que gestione todas las peticiones realizadas por los usuarios, y a la vez mantener la autonomía de cada uno de los telescopios por separado, el planificador local del telescopio se debe tener en cuenta como parte del sistema de planificación de la red.

Esta particularidad de la red GLORIA hace que las técnicas de planificación actuales no se puedan implementar directamente en su planificador. De ahí que se haya diseñado e implementado un planificador propio (Capítulo 4).

Por otro lado, en este capítulo también se ha visto que tanto las redes de telescopios como los telescopios individuales analizan el rendimiento de los mismos a través de simulaciones. Normalmente no se estudia el comportamiento de todo el sistema sino de parte del mismo, existiendo ejemplos de simulaciones del comportamiento de un telescopio dentro de una red, del rendimiento de parte de una red para un objetivo científico en concreto, etc.

De igual forma, para ver el rendimiento del planificador propuesto para la red GLO-RIA, se ha desarrollado un entorno de simulación, en el que se han modelado varios parámetros de la red y de los telescopios (Capítulo 6).

Capítulo 3

Metodología

3.1. Introducción

Este capítulo va a describir la metodología seguida para llevar a cabo cada una de las contribuciones que se detallaron en el apartado 1.2. Cada una de ellas ha sido abordada de manera distinta así que el análisis de la metodología seguida se hace de manera independiente en los siguientes apartados.

3.2. Metodología seguida para el desarrollo del planificador

Como se ha visto en el capítulo 2, no se han encontrado referencias bibliográficas de redes de telescopios en los que no se tenga el control total sobre el telescopio. Aunque existen ejemplos en los que la asignación del telescopio es un parámetro más dentro del proceso de planificación temporal (Arregui et al., 2012; Lampoudi et al., 2015), no se han encontrado planificadores de redes en las que el funcionamiento principal del mismo sea sólo la asignación de un telescopio por observación. Esto implica que el diseño del planificador no se va a basar en ninguno de los ejemplos vistos en el capítulo anterior.

A continuación se enumeran y explican los pasos que se han llevado a cabo para su diseño, considerando como una premisa inicial el diseño de una arquitectura modular y escalar.

1. Definición de los campos de la petición de observación

Para la definición de los campos que componen la petición de observación se ha contado con la ayuda de astrónomos profesionales que indicaron aquellos parámetros que se consideraban imprescindibles para definir la observación. También

participaron en la clasificación de dichos parámetros como básicos, a utilizar por astrónomos amateurs, y avanzados, a utilizar por astrónomos profesionales (véase el apartado 4.2).

2. Definición de los distintos módulos que compone la arquitectura del planificador

Partiendo de la definición de los campos de una petición de observación y del tipo de restricciones con las que se ha de trabajar, se diseñaron un conjunto de módulos asociados a cada uno de los tipos de restricciones que había que comprobar, restricciones temporales, fijas y estudio de visibilidad (véase el apartado 4.2).

El hecho de que un tipo de restricciones fueran asociadas a la observación en sí y que otras dependieran además del observatorio, contribuyó a definir la arquitectura del planificador. De esta manera se diseñó un nodo principal, centralizado para toda la red, que llevara a cabo los procesos asociados a la observación e independientes del observatorio. Por otro lado, se diseñaron nodos asociados a los observatorios, distribuidos por la red, que procesarían todo lo dependiente de la ubicación. Además, estos nodos se encargarían de la comunicación directa con el telescopio.

3.3. Metodología seguida para el desarrollo de los algoritmos de decisión

Las técnicas, asociadas a la planificación, que se han encontrado en la bibliografía asignan una serie de observaciones a unos telescopios en unos tiempos específicos. Técnicas como propagación de restricciones, algoritmos genéticos, programación lineal de enteros mixta, etc. ordenan las observaciones asignándole un período de tiempo de ejecución en uno de los telescopios disponibles en la red. Sin embargo, el algoritmo de decisión de telescopio necesario en la implementación del planificador de la red GLORIA, no tiene el mismo objetivo. De ahí, que se hayan implementado algoritmos con técnicas distintas.

La elección de las distintas técnicas empleadas ha dependido de distintos factores en función de la necesidad, aunque en todas ellas se buscó el uso de una técnica sencilla, sin

necesidad de cómputo elevado y que se pudiera realizar de manera instantánea, es decir, sin un tiempo de procesado elevado.

A continuación se justifica la elección de las distintas técnicas asociadas a cada algoritmo implementado.

- **Algoritmo meteorológico**

Para el primer algoritmo desarrollado se buscaba rapidez de diseño para poder ponerlo en producción cuanto antes. De ahí que se eligiera hacer un cálculo matemático sencillo para la obtención de la puntuación de cada telescopio. Analizado el principal problema de no ejecución en los telescopios, se decidió que el algoritmo se basara en la predicción meteorológica en la ubicación del observatorio. Partiendo de este hecho, se estudiaron diversos proyectos de acceso libre para la predicción meteorológica y se eligió uno que proporcionaba adicionalmente datos astronómicos.

- **Algoritmo de lógica difusa**

Para mejorar las prestaciones del algoritmo meteorológico, puesto que no se contaba con datos cuantitativos sobre el porqué de la ejecución o no de una observación en un telescopio, se decidió utilizar lógica difusa ya que permite trabajar con un alto grado de imprecisión.

Además, se decidió incluir más datos de entrada para la decisión, para que en el caso en el que la predicción meteorológica no fuese completamente favorable en un observatorio se tuvieran en cuenta aspectos como la calidad de la observación y la tasa de aceptación de observaciones en los telescopios.

- **Algoritmo probabilístico**

Tomando de base el algoritmo de lógica difusa, que obtenía mejores prestaciones que el meteorológico, se buscó adaptar la decisión del telescopio a las condiciones cambiantes que hacían que un telescopio dejase de estar operativo en la red.

Partiendo de un histórico de datos que ya se tenían del uso del planificador dentro de la red GLORIA, se decidió obtener la probabilidad de aceptación de los telescopios en función de las condiciones meteorológicas y que esta probabilidad no fuese

estática sino que se fuese adaptando a las condiciones reales de la red. Una técnica sencilla de utilizar y que se puede adaptar con el planificador funcionando, sin necesidad de realizar una parada en el servicio para adaptar la respuesta, son los modelos de regresión lineal generalizada que se utilizaron en este algoritmo.

3.4. Metodología seguida para el desarrollo del modelo de la red

Al igual que ha pasado en los apartados anteriores, ninguna de los entornos de simulación propuestos en la bibliografía pueden utilizarse para modelar la red GLORIA y poder comparar los tres algoritmos de decisión diseñados. De ahí que se desarrollara un entorno de simulación propio. La metodología seguida se detalla a continuación, analizando de manera independiente el modelo utilizado para las variables y para la red.

■ Modelo de las variables

1. Identificación de variables necesarias.

Las variables a modelar son aquellas que se utilizan como entrada a los algoritmos de decisión, junto con una nueva variable asociada a cada telescopio y que indica si la observación asignada se ejecutará o no.

2. Período de adquisición de datos.

Para modelar las variables hay que recoger datos reales proporcionados por la red GLORIA que se tomarán como base para su modelo.

3. Definición del modelo.

Las variables utilizadas como entradas a los algoritmos de decisión han sido modeladas utilizando distribuciones de probabilidad. Dependiendo de las características de unas y otras se ha optado por un tipo de distribución u otra. En cuanto a la variable asociada a la aceptación o no de la observación por parte del telescopio se ha utilizado un modelo de regresión generalizada configurado de manera que la aceptación dependa de los factores meteorológicos del observatorio.

4. Validación del modelo.

Validación individual de cada variable con respecto a los datos reales y validación en su conjunto en el uso por parte del modelo de la red.

■ Modelo de la red

1. Análisis del sistema real.

Se analiza el comportamiento de la red real GLORIA para decidir qué técnica de simulación de sistemas a emplear. Se decide utilizar un modelo basado en sistemas de eventos discretos, en los que el evento que se va propagando por el modelo es la petición de observación en sí.

2. Definición de objetos y bloques del modelo.

Identificación de los distintos objetos y bloques necesarios en el modelo para reproducir el comportamiento de la red GLORIA con respecto a la ejecución o no de las distintas observaciones por parte de los telescopios.

3. Validación del modelo.

Validación del modelo comparando con un período de tiempo real de la red GLORIA.



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

Capítulo 4

Planificador de observaciones

4.1. Introducción

En este capítulo se presenta el diseño del planificador implementado y desplegado para la red de telescopios GLORIA. Tal y como se indicó en el apartado 2.4, esta red está formada por 18 telescopios, con características heterogéneas, ubicados en cuatro continentes. Parte de la gestión de esta red es llevada a cabo por el planificador, que se encarga de recibir peticiones de observación de usuarios y enviárselas a uno de los telescopios de la red.

Con el fin de mejorar la experiencia del usuario, el planificador ha sido diseñado e implementado para maximizar el número de peticiones ejecutadas y su calidad. Además, resulta interesante minimizar el tiempo transcurrido desde que se solicita hasta que se ejecuta la petición tal y como ocurre en otras redes de telescopios. Para esto, se necesita un algoritmo que decida el mejor telescopio al que ofrecer la ejecución de la observación. Evitando ofrecer una petición a un telescopio que finalmente no pueda ejecutarla.

El planificador de GLORIA se basa en una arquitectura en capas como se muestra en la figura 4.1. Justo por debajo de la capa dedicada al usuario, aparece el nodo central, cuya principal función es elegir el telescopio que ejecute la observación. El segundo nivel lo forman los nodos locales que van asociados uno a uno a cada telescopio. Su función principal es determinar si el objeto a observar es visible o no desde la ubicación del telescopio. Finalmente, la capa más baja de la arquitectura está formada por el planificador de los telescopios. Aunque estos planificadores locales no han sido diseñados ni implementados para el planificador de la red GLORIA, forman parte de la arquitectura ya que

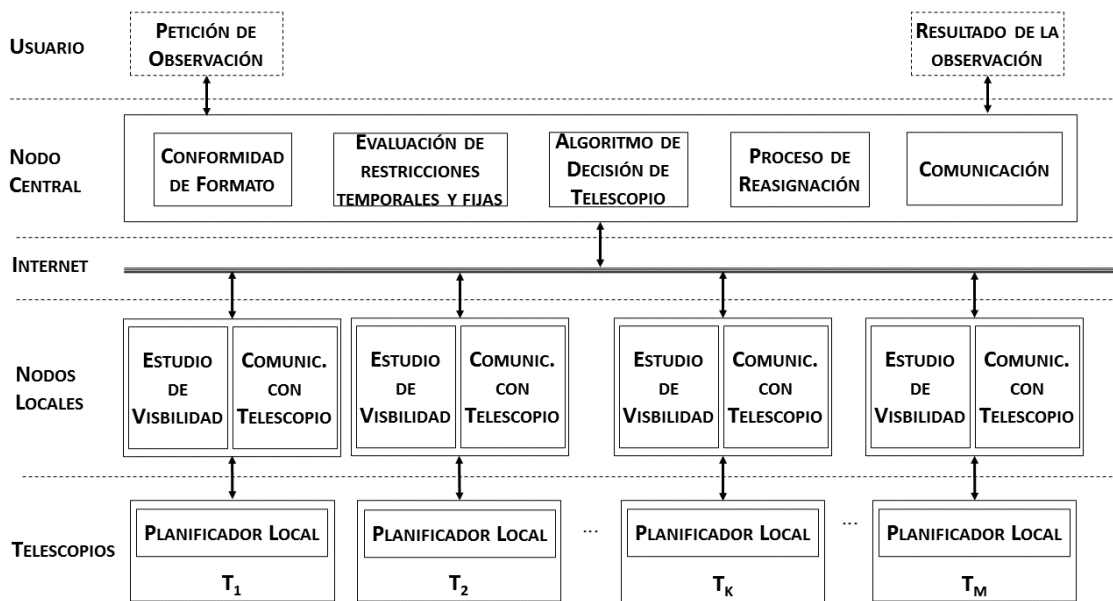


FIGURA 4.1: Arquitectura del planificador.

son los que realmente ejecutarán la petición. Son los que deciden en qué momento exacto ejecutar las observaciones. Esta política de gestión depende directamente del tipo de planificador del telescopio, pero debe garantizarse que la solicitud de la red GLORIA se incluya en el tiempo asignado para la red.

A continuación se van a detallar las distintas funciones que se realizan en cada una de las capas que conforman la arquitectura, partiendo del nivel de usuario.

4.2. Usuario

La primera capa de la arquitectura la conforma el usuario en sí. Éste genera una petición de observación y recibe el resultado de la misma. Una petición se define como la unidad básica usada en la planificación de cualquier telescopio, una descripción formal de la observación que se quiere realizar. Normalmente cada telescopio define los parámetros que debe incluir la petición, de manera que el planificador del mismo tenga toda la información necesaria para establecer el orden de ejecución. Tal es el caso de la red LCOGT en la que cada petición de observación queda definida por una 4-tupla que incluye duración, prioridad, telescopio y ventana de observación (Lampoudi and Saunders, 2013).

Desde 1999, e inicialmente creado por el proyecto Hands-On Universe de la universidad de Berkeley (Universe, 2020), se han ido desarrollado distintas versiones de un protocolo basado en XML para la definición e intercambio de peticiones de observación de manera genérica, *The Remote Telescope Markup Language (RTML)*. Los documentos RTML se utilizan para documentar la evolución completa de una petición, incluyendo distintas fases: definición de la solicitud, descripción de la observación real y todo el proceso hasta la entrega final de los datos al usuario (Hessman, 2006).

En el caso de la red GLORIA, se ha seguido la filosofía de RTML definiendo una petición de observación basada en XML, utilizando aquellos campos necesarios para que, por un lado el planificador de la red determine qué telescopio la ejecutará; y por otro, que el telescopio obtenga todos los datos necesarios para su ejecución.

Una petición de observación en la red GLORIA tiene dos partes principales: las instrucciones y las restricciones. Las instrucciones contienen toda la información necesaria para que el telescopio ejecute la observación en sí. Por otro lado, las restricciones engloban todo los datos necesarios para que el planificador decida como gestionar dicha petición. En el caso específico de la red GLORIA, las restricciones serán utilizadas por el planificador para decidir a qué telescopio ofrecer la observación recibida.

Adicionalmente, aparece una tercera parte dentro de la petición de observación, los metadatos. Este bloque contiene información necesaria para que el planificador gestione adecuadamente todas las peticiones recibidas a nivel interno.

Como la red GLORIA está enfocada para todo tipo de usuarios, tanto profesionales como amateurs, se han incluido, tanto en las instrucciones como en las restricciones, parámetros básicos y avanzados. Los parámetros avanzados son utilizados principalmente por astrónomos profesionales, mientras que los básicos permiten a los astrónomos amateurs trabajar más fácilmente.

A continuación se analiza en detalle cada uno de los parámetros incluidos en los tres bloques que componen una petición de observación en la red GLORIA. A modo de resumen, la tabla 4.1 detalla todos los parámetros necesarios para completar la petición de la observación, incluyendo la distinción entre básicos y avanzados.

TABLA 4.1: Parámetros de la petición de observación.

	Parámetro	Tipo	Descripción
Visibilidad	Distancia a la Luna	Básico/ Avanzado	Distancia mínima entre el objeto a observar y la Luna
	Altitud de la Luna	Básico/ Avanzado	Altitud máxima de la Luna
	Masa de aire	Avanzado	Cantidad de atmósfera atravesada por un rayo de luz del objeto
	Altitud del objeto	Básico	Altitud mínima del objeto a observar
Restricciones Tiempo	"No antes de"	Avanzado	Fecha a partir de la cual se puede realizar la observación
	"No después de"	Avanzado	Fecha máxima para realizar la observación
	Días desde Luna Nueva	Avanzado	Días transcurridos desde Luna nueva para realizar la observación
Fijas	Escala de píxeles	Avanzado	Escala de píxeles de la cámara del telescopio
	Visibilidad astronómica	Avanzado	Parámetro que informa sobre el efecto distorsionador de la atmósfera
	FoV	Avanzado	Campo de visión de la cámara del telescopio
Instrucciones	RADEC del objeto	Avanzado	Posición del objeto a observar en coordenadas ecuatoriales
	Nombre del objeto	Básico	Nombre del objeto a observar
	SNR	Avanzado	Relación señal a ruido
	Magnitud	Avanzado	Magnitud del objeto a observar
	Tiempo de exposición	Básico	Tiempo de exposición de la cámara del telescopio
	Filtro	Básico/ Avanzado	Filtro a utilizar en la observación

Instrucciones

El bloque de instrucciones contiene toda la información necesaria para que el telescopio elegido pueda ejecutar la observación. Este bloque incluye tres tipos de información: el objeto a observar, el tipo de filtro que hay que utilizar para realizar la observación y el tiempo de exposición de la misma.

Objeto a observar.

El objeto a observar queda definido por uno de los dos siguientes parámetros: su posición en el cielo o su nombre. El primero se considera un parámetro avanzado porque habrá usuarios no profesionales que no conozcan esta información o no sepan cómo conseguirla. Por ello, se incluye el nombre del objeto como parámetro básico. Siendo un parámetro excluyente con respecto al otro.

La posición se indica a través de las coordenadas ecuatoriales. Estas coordenadas forman un sistema que permite ubicar un objeto en la esfera celeste con respecto al ecuador celeste y al equinoccio vernal (intersección de la eclíptica y el ecuador celeste cuando el Sol pasa del hemisferio celeste Sur al Norte). Los dos parámetros que las definen son: la ascensión recta (RA) y la declinación (DEC).

La ascensión recta es el ángulo, medido sobre el ecuador celeste, entre el equinoccio vernal y el meridiano que pasa por el objeto a observar. La declinación es el ángulo que forman el ecuador celeste y el objeto.

Los telescopios normalmente necesitan las coordenadas ecuatoriales para poder apuntar el telescopio. De ahí que, cuando el nombre del objeto es especificado en la petición de observación, se hace uso de proyectos libres que resuelven el nombre del objeto celeste a observar devolviendo las coordenadas ecuatoriales a través de interfaces *Machine to Machine* (M2M). Algunos ejemplos de estos proyectos son Simbad (Simbad, 2019) o Sesame (Sesame, 2019), en el caso de la red GLORIA se utilizó Simbad.

Filtro.

La mayoría de las imágenes astronómicas se registran a través de filtros ópticos especiales que aíslan regiones particulares del espectro electromagnético. En la región visible del espectro (aproximadamente 400 - 800 nm), corresponden a los colores conocidos. Algunos filtros son anchos, lo que significa que la luz de una amplia gama de longitudes de onda (varios colores diferentes) puede pasar a través de ellos, mientras que otros son bastante estrechos, aislando así la luz emitida por determinados átomos y moléculas. Por lo tanto, cualquier observación debe describirse también en términos de la longitud de onda de la luz que se registra. Por ejemplo, es común utilizar los llamados filtros estándar anchos B, V y R que aíslan la luz azul, verde-amarilla y roja, respectivamente.

En el caso de la red GLORIA, el usuario puede elegir el filtro a utilizar en la observación del listado de filtros disponible en cada uno de los telescopios de la red.

Tiempo de exposición.

Por último, hay que establecer el tiempo de exposición de la observación, es decir, el tiempo que el obturador permanecerá abierto para tomar la imagen. Este tiempo dependerá del tipo de objeto a observar. Este parámetro es sencillo de utilizar para aquellos usuarios no expertos. Sin embargo, los astrónomos profesionales suelen preferir trabajar con parámetros tales como la magnitud del objeto y la relación señal a ruido (SNR).

Conociendo la magnitud del objeto a observar, el filtro con el que se realizará la captura y las propiedades del telescopio y de la cámara se puede calcular el tiempo de exposición óptimo (Falomo et al., 2011). En el caso de elegir completar estos parámetros avanzados, el planificador calcularía el tiempo de exposición necesario en función del telescopio elegido.

Restricciones

Las restricciones de la petición de observación son cualquier requisito que afecte, o pueda afectar, la forma en la que se planifica la observación en la red. Es decir, van a acotar en qué telescopio o telescopios se podría ejecutar la observación y en qué período temporal.

Estas restricciones se dividen en tres tipos: restricciones de tiempo, fijas y de visibilidad. Las restricciones de tiempo definen cuándo la observación debe realizarse; las restricciones fijas acotan el telescopio/observatorio que finalmente ejecutará la observación; y finalmente las restricciones de visibilidad son parámetros dinámicos que determinan cómo el objeto debe ser observado en relación a su posición en el cielo.

Restricciones de tiempo.

Las restricciones de tiempo definen una ventana temporal en la que la observación podría llevarse a cabo. Los parámetros, considerados avanzados, que definen esta ventana son:

- "No antes de". En este parámetro se especifica la fecha a partir de la cual el usuario desea que se realice la observación.
- "No después de". En este parámetro se especifica la fecha límite definida por el usuario a partir de la cual la observación no se puede realizar.

- "Número de días desde luna nueva". En este parámetro se especifica el número de días mínimos que han tenido que transcurrir desde la fecha de la última luna nueva para poder realizar la observación.

Esta ventana temporal es combinada posteriormente con la información de las restricciones de visibilidad para definir la ventana temporal final en la que se debe realizar la observación.

Restricciones fijas.

Las restricciones fijas acotan por un lado el tipo de CCD o cámara que debe realizar la observación y por otro, la ubicación desde donde se debe realizar la misma. Los parámetros asociados a estas restricciones se consideran avanzados y son los siguientes:

- Escala de píxeles. Parámetro que indica cuantos segundos de arco entran dentro de un píxel de la cámara.
- Campo de visión. Parámetro que indica el valor mínimo del ángulo abarcable por la CCD para realizar la observación.
- Visibilidad atmosférica. Parámetro que informa sobre el efecto distorsionador de la atmósfera sobre las imágenes de los objetos. Este efecto está causado por turbulencias atmosféricas que producen variaciones de densidad que deforman el camino óptico recorrido por los rayos de luz de los objetos.

Restricciones de visibilidad.

Las restricciones de visibilidad definen una ventana de tiempo en la que realizar la observación. Pero a diferencia de las restricciones temporales, esta ventana viene definida por la posición del objeto dentro del cielo.

Los parámetros básicos que definen esta ventana son la distancia mínima que debe haber entre el objeto y la luna; la altitud máxima de la luna en el momento de la observación; y la altitud mínima del objeto a observar.

Adicionalmente se ha definido un parámetro avanzado, la masa de aire. Éste parámetro sustituiría al parámetro de altitud mínima del objeto, ya que a partir de él se puede calcular éste (Rapp-Arrarás and Domingo-Santos, 2011).

4.3. Nodo central

El nodo central es el núcleo principal del planificador y tiene cuatro funciones principales:

- Control de conformidad del formato de las peticiones.

Consiste en comprobar la conformidad del formato de la petición de observación. No todos los parámetros definidos en el apartado 4.2 deben aparecer siempre en las peticiones. Como se ha visto se han definido parámetros básicos y otros avanzados, siendo a veces, unos sustitutivos de los otros. El nodo central debe comprobar este tipo de restricciones, así como que no falta ningún parámetro por especificar ni que se haya incluido alguno no considerado en el diseño del planificador.

- Evaluación de restricciones fijas y temporales.

Al establecer los parámetros asociados a las restricciones temporales se está definiendo una ventana temporal en la que la observación tiene que ejecutarse. El nodo central debe comprobar que esos márgenes temporales no definen un tiempo pasado.

En cuanto a los parámetros de las restricciones fijas, definen una serie de características intrínsecas a los telescopios y al observatorio en los que se ubican. Así que esta evaluación consiste en comparar las características de los observatorios y los telescopios de la red GLORIA con el valor de dichos parámetros. De esta forma se determinan qué telescopios podrían ejecutar la observación.

- Decisión del telescopio.

Es la función principal del nodo central, decidir a través de un algoritmo a qué telescopio ofrecer cada una de las observaciones recibidas por el planificador. Una elección acertada del telescopio, hará que la observación se realice en el menor tiempo posible, además de maximizar el número de observaciones realizadas con éxito. En la red GLORIA se han definido distintos algoritmos de decisión de telescopio que serán definidos y analizados en detalle en el capítulo 5.

- Reasignación de observaciones.

La observación ofrecida a un telescopio en concreto, puede ser rechazada o no ejecutada por diversos motivos: meteorológicos, problemas en el telescopio, etc. Si

esto ocurre, el nodo central debe reasignar la observación a un nuevo telescopio. El proceso de reasignación dura varios días, es decir, una solicitud de observación no ejecutada puede reasignarse durante un período de tiempo. Transcurrido este período, si la observación no se ha realizado, se informa al usuario de que no se han tomado imágenes.

4.4. **Nodo local**

Cada nodo local de la red GLORIA está asociado uno a uno con un telescopio de la red y tiene dos funciones principales:

- **Estudio de visibilidad.**

Este estudio consiste en analizar si el objeto que tiene que ser observado cumple las restricciones de visibilidad y se encuentra por encima del horizonte en algún momento dentro del intervalo de tiempo cedido por el propietario para el uso de la red GLORIA.

- **Comunicación con el planificador del telescopio asociado.**

La comunicación con el planificador del telescopio es bidireccional y para ello los nodos locales implementan dos procesos. Un proceso publicador de datos, que se encarga de transformar la petición de observación que recibe el planificador en el formato adecuado del planificador del telescopio. La forma en la que se trasfiere la información depende del sistema de control del telescopio y de su propio planificador: creando y cargando un fichero en un formato concreto (ACP), utilizando un interfaz específico de comunicación para crear y planificar una observación (RTS2), etc.

Por otro lado, existe un proceso que recibe toda la información sobre la petición de observación que ha sido enviada al telescopio. Además, recupera las imágenes, si la observación ha sido finalmente ejecutada, y las almacena en un repositorio local. La información sobre la petición es utilizada para informar al nodo central del resultado de la observación que se le había ofrecido.

4.5. Flujo de la peticiones

El proceso de gestión de peticiones, que puede verse en la figura 4.2, comienza con la recepción de las peticiones de observación. Los usuarios generan peticiones de observación que son gestionadas por el nodo central. El primer paso a realizar por éste es comprobar la conformidad del formato de la petición. Una vez que esto ha sido confirmado, el nodo central evalúa las restricciones fijas y las temporales obteniendo una lista preliminar de telescopios que puedan ejecutar la observación.

A continuación se lleva a cabo el estudio de visibilidad, que es realizado por los nodos locales de los telescopios seleccionados. Una vez realizado este estudio, cada nodo local transfiere el resultado al nodo central quien actualiza la lista de telescopios disponibles, incluyendo sólo aquellos telescopios que satisfacen tanto las restricciones fijas, las temporales como las de visibilidad.

Posteriormente, el nodo central elige el telescopio que finalmente ejecutará la observación a través del algoritmo de decisión. Entonces, el nodo central comunica esta decisión al nodo local asociado quien gestionará la ejecución de la observación en el planificador local del telescopio elegido.

Si finalmente la observación no ha sido ejecutada, el nodo central reasigna dicha observación a otro telescopio. Si la reasignación se produce en un margen temporal incluido en el estudio de visibilidad que se hizo inicialmente, el proceso consiste en eliminar el telescopio de la lista de telescopios disponibles y elegir otro a través del algoritmo de decisión. En caso contrario, se realizará un nuevo estudio por los nodos locales, actualizándose la lista final de telescopios disponibles.

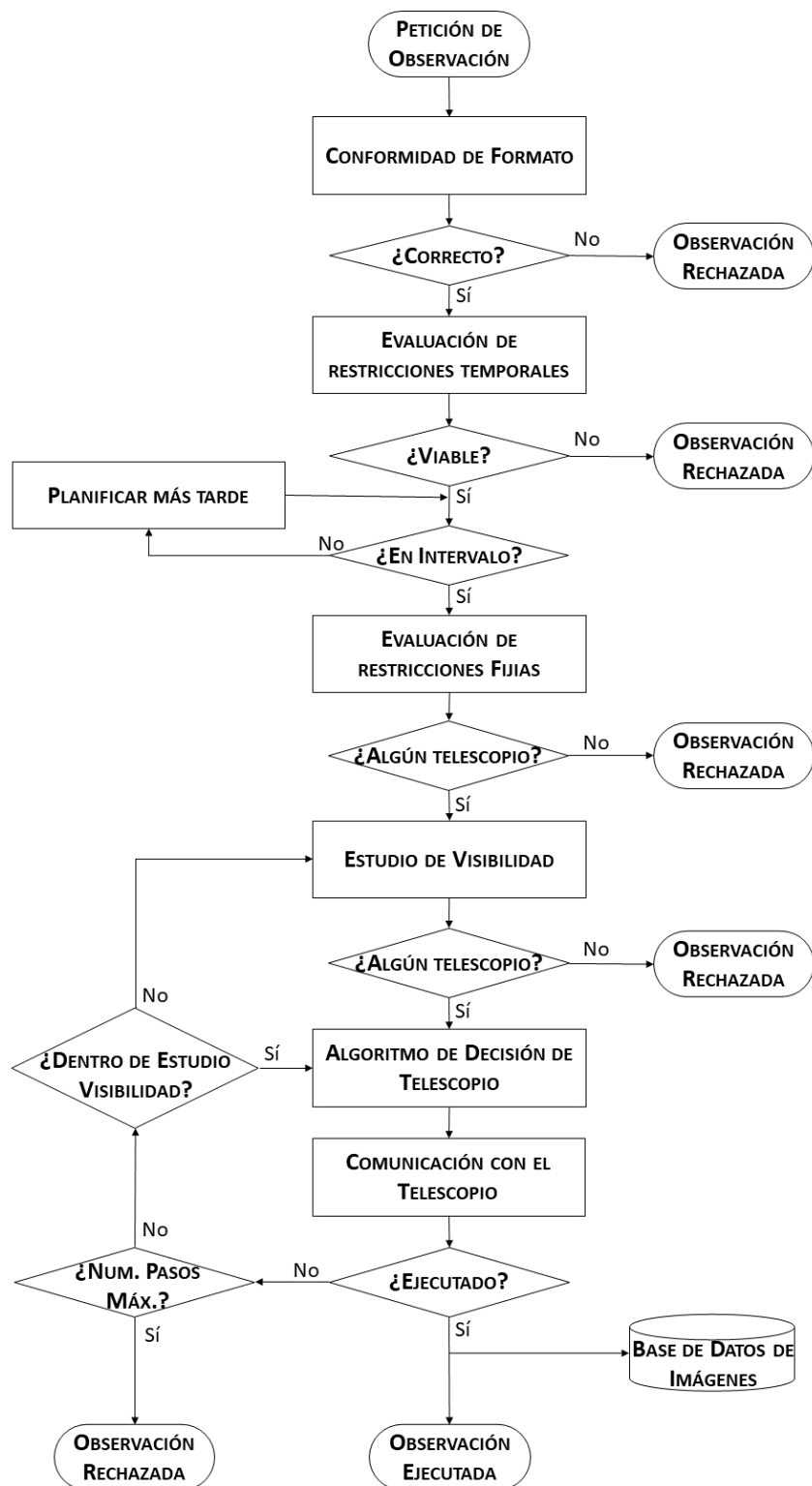


FIGURA 4.2: Diagrama de flujo de las peticiones de observación.



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

Capítulo 5

Algoritmo de decisión

5.1. Introducción

Este capítulo se centra en la función principal del nodo central, en la decisión del telescopio que ejecutará la observación. Esta decisión se lleva a cabo a través de un algoritmo que hace la elección en función de ciertos parámetros.

La decisión del telescopio candidato a realizar la observación es clave en el proceso de planificación de la red. Una buena elección del telescopio, permitiría que la observación se realice en el menor tiempo posible, además de maximizar el número de observaciones realizadas con éxito. En este sentido, se puede plantear un problema de optimización multiobjetivo, definido por una función objetivo y otra de coste. La función objetivo del algoritmo sería maximizar el número de peticiones de observación completadas con éxito, es decir, el porcentaje de aceptación de la red. Por otro lado, el coste de la misma es el número de telescopios por los que ha de pasar la observación hasta que uno de ellos finalmente sea capaz de ejecutarla. Esto último está directamente relacionado con el tiempo que transcurre desde que un usuario realizó una petición de observación y recibió las imágenes correspondientes.

Sea $A_G = \{T_1, T_2, \dots, T_G\}$ el conjunto de telescopios disponibles en la red GLORIA para la ejecución de las observaciones recibidas por el planificador y O_N un grupo de N observaciones. La función objetivo para dicho grupo de observaciones y para un número máximo de saltos S , es decir, número máximo de telescopios a los que será ofrecida, queda definida como:

$$T_{acep}(O_N) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \min\left(1, \sum_{T_j \in A_i} m(O_i, T_j) \cdot d(O_i, T_j)\right) \quad (5.1)$$

siendo $T_{acep}(O_N)$ la tasa de aceptación para el grupo de observaciones O_N ; y A_i , un subconjunto de A_G ($A_i \subset A_G$) con un máximo de S telescopios en los que la observación O_i podría ser ejecutada. Realmente pueden existir más de S telescopios que puedan ejecutar la observación, pero el número máximo de saltos en reasignación ha sido fijado a ese valor para limitar la duración máxima de la ejecución de la observación. Por otro lado, $m(O_i, T_j) \in \{0, 1\}$ y $d(O_i, T_j) \in \{0, 1\}$ son dos funciones, que devuelven un valor binario, indicando si la observación O_i se pudo observar por el telescopio $T_j \in A_i$, debido a las condiciones meteorológicas de su observatorio y a su disponibilidad respectivamente.

De igual forma, la función de coste para el mismo grupo de observaciones y para un número máximo de saltos S se puede definir como:

$$M(O_N) = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(1 + \sum_{T_j \in A_i} (1 - m(O_i, T_j) \cdot d(O_i, T_j)) \right) \right] \quad (5.2)$$

siendo $M(O_N)$ la media del número de saltos en el peor caso asociado a dicho grupo de observaciones. Este parámetro está directamente relacionado con el tiempo máximo transcurrido desde que la observación es solicitada hasta que se ejecuta.

Debido a que la información que proporcionan las funciones $m(O_i, T_j)$ y $d(O_i, T_j)$ no se conoce hasta el instante en el que la observación O_i se va a ejecutar en el telescopio T_j , técnicas como las que se han visto en el capítulo 2 no pueden ser utilizadas directamente. Este tipo de técnicas requieren el conocimiento previo de todos los parámetros utilizados en la optimización y normalmente son utilizados para crear una planificación de un período de tiempo. Sin embargo, dicha información se puede predecir, permitiendo de este modo hacer una mejor selección de los telescopios a los que ofrecer la observación.

Se definen por tanto dos nuevas funciones que predicen el comportamiento del telescopio. La función $\hat{m}(O_i, T_j) \in \{0, 1\}$ predice si la observación O_i se ejecutará o no debido a factores meteorológicos; mientras que la función $\hat{d}(O_i, T_j) \in \{0, 1\}$ predice la disponibilidad del telescopio para esa misma observación. Así mismo, se define un nuevo conjunto de telescopios, A'_i , como el conjunto de todos los telescopios cuya predicción sobre la ejecución de la observación O_i es positiva.

$$A'_i = \{T_j \in A_G \mid \hat{m}(O_i, T_j) \cdot \hat{d}(O_i, T_j) = 1\} \quad (5.3)$$



El número de elementos de este conjunto puede ser mayor, menor o igual que el número máximo de saltos permitidos $|A'_i| \geq S$.

Teniendo en cuenta las dos funciones de disponibilidad predichas y el conjunto de telescopios asociado a las mismas, las ecuaciones 5.1 y 5.2 se redefinirían como:

$$\hat{T}_{acep}(O_N) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \min\left(1, \sum_{T_j \in A''_i} \hat{m}(O_i, T_j) \cdot \hat{d}(O_i, T_j)\right) \quad (5.4)$$

$$\hat{M}(O_N) = \left\lceil \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(1 + \sum_{T_j \in A''_i} (1 - \hat{m}(O_i, T_j) \cdot \hat{d}(O_i, T_j))\right) \right\rceil \quad (5.5)$$

siendo $\hat{T}_{acep}(O_N)$ y $\hat{M}(O_N)$ la tasa de aceptación predicha y el número de pasos en caso peor predicho, respectivamente, para el grupo de observaciones O_N .

Además se define un nuevo conjunto de telescopios, A''_i compuesto por un máximo de S telescopios. El número de telescopios de este conjunto viene determinado por el número total de telescopios que pueden ejecutar la observación O_i , limitándose a S telescopios en el caso en el que hayan más disponibles. En el caso en el que hubiera menos, el número de telescopios en este subconjunto sería igual al de los telescopios disponibles para dicha observación.

Por otro lado, este conjunto está formado principalmente por los telescopios del conjunto A'_i . Para el caso en el que $|A'_i| \geq S$, el conjunto A''_i estará formado únicamente por telescopios que predicen una ejecución positiva de la observación O_i . Sin embargo, si $|A'_i| < S$, este conjunto se completa con los telescopios que pueden ejecutar la observación O_i aunque no predigan su ejecución positivamente hasta completar un máximo de S telescopios.

Es decir, el conjunto A''_i está formado por aquellos telescopios en los que se predice la ejecución de la observación y aquellos en los que no se predice hasta completar el número máximo de telescopios en el conjunto (ecuación 5.6).

$$A''_i = Y(A'_i, S) \cup Y(A_i, \min[|A_i|, S] - |Y(A'_i, S)|) \quad (5.6)$$

donde $Y(F, g)$ se define como el subconjunto del conjunto F con una cardinalidad máxima de g elementos. Es decir, $Y(A'_i, S)$, se define como un subconjunto de A'_i de hasta S telescopios; y $Y(A_i, \min[|A_i|, S] - |Y(A'_i, S)|)$, como un subconjunto de A_i , el conjunto

de telescopios que pueden ejecutar la observación O_i , con un número de elementos tal que el subconjunto A''_i alcance su valor máximo: el número máximo de saltos permitidos o el número máximo de telescopios que pueden ejecutar dicha observación.

Según la ecuación 5.2, el valor máximo de saltos asociado a la observación O_i queda definido como:

$$\text{máx}(M(O_i)) = 1 + |A_i| \leq 1 + S \quad (5.7)$$

$|A_i| = S$ cuando existe un número igual o superior a S de telescopios que pueden ejecutar la observación O_i ; en cualquier otro caso es inferior.

Por otro lado, el número de saltos máximos predicho para una observación O_i , según la ecuación 5.5, queda definido como:

$$\text{máx}[\widehat{M}(O_i)] = 1 + |A_i| - |Y(A'_i, S)| \quad (5.8)$$

Como $0 \leq |Y(A'_i, S)| \leq |A_i|$, el máximo de saltos predicho es inferior o igual al teórico para una observación O_i , lo que implica que para el conjunto de observaciones O_N también lo sea:

$$\begin{aligned} 0 \leq |Y(A'_i, S)| \leq S &\implies \text{máx}[\widehat{M}(O_i)] \leq \text{máx}[M(O_i)] \\ \text{máx}[\widehat{M}(O_i)] \leq \text{máx}[M(O_i)] &\implies \text{máx}[\widehat{M}(O_N)] \leq \text{máx}[M(O_N)] \end{aligned} \quad (5.9)$$

Del mismo modo, a partir de las ecuaciones 5.1 y 5.4, se obtiene la mínima tasa de aceptación para una observación y para la predicción de la misma:

$$\begin{aligned} \text{mín}[T_{acep}(O_i)] &= \text{mín}[1, 0] = 0 \\ \text{mín}[\widehat{T}_{acep}(O_i)] &= \text{mín}[1, |A'_i|] = \begin{cases} 0, & \text{si } |Y(A'_i, S)| = 0. \\ 1, & \text{si } |Y(A'_i, S)| > 0. \end{cases} \end{aligned} \quad (5.10)$$

Se puede observar, como de manera equivalente al número máximo de saltos, se puede obtener una tasa de aceptación predicha mejor o igual que la teórica:

$$\begin{aligned}
0 \leq |Y(A'_i, S)| \leq S &\implies \min[\widehat{T}_{acep}(O_i)] \geq \min[T_{acep}(O_i)] \\
\min[\widehat{T}_{acep}(O_i)] \geq \min[T_{acep}(O_i)] &\implies \min[\widehat{T}_{acep}(O_N)] \geq \min[T_{acep}(O_N)]
\end{aligned} \tag{5.11}$$

De esta manera si se obtienen las funciones $\widehat{m}(O_i, T_j)$ y $\widehat{d}(O_i, T_j)$ se podrían elegir los telescopios a los que se ofrece la observación, O_i , según su predicción y por tanto, se podría mejorar el caso peor tanto para el número máximo de saltos como para la tasa de aceptación de observaciones.

Estas funciones se van a obtener de manera indirecta asociándole a los telescopios una puntuación que va directamente relacionada con la predicción de la probabilidad de ejecución de una observación. Para esta puntuación se tendrán en cuenta factores meteorológicos ($m(O_i, T_j)$) y factores propios del telescopio ($d(O_i, T_j)$), de manera que se optimicen las funciones de coste y objetivo definidas en las ecuaciones (5.4) y (5.5), prediciendo la disponibilidad de los distintos telescopios. Para ello, se van a definir varios algoritmos de decisión que puntuarán a todos los telescopios del conjunto A_i y seleccionarán a aquellos telescopios con mayor puntuación para formar el conjunto ordenado A''_i . Si se define la puntuación del telescopio T_j para la observación O_i como ϕ_j^i , el conjunto A''_i se define como:

$$A''_i = \left(T_j \mid \phi_j^i \in \Psi(\phi_K, S) \right) \tag{5.12}$$

donde ϕ_K es el conjunto de puntuaciones de los telescopios del conjunto A_i ; y $\Psi(\phi_K, S)$ es un subconjunto de ϕ_K con las S mejores puntuaciones. Atendiendo a la relación "menor o igual que", \leq , de estas puntuaciones el conjunto de telescopios A''_i pasa a ser un conjunto ordenado. De esta forma, la elección del telescopio que ejecuta la observación se realiza a través del orden determinado en el conjunto de telescopios A''_i .

Teniendo en cuenta lo anterior, se han diseñado tres algoritmos distintos que ordenan los telescopios atendiendo a su predicción de ejecución. Inicialmente se diseñó un algoritmo más sencillo basado únicamente en la predicción meteorológica (Apartado 5.2). Sin embargo, el hecho de que los tiempos de respuesta de los telescopios no fueran fijos, ya que se desconoce el momento en el que la observación se ejecutará por un telescopio; así como la posibilidad de que éste no se ejecute finalmente, hizo plantear un algoritmo,

basado en lógica difusa (Apartado 5.3), que tuviera en cuenta parámetros de entrada adicionales. Sin embargo, ninguno de estos dos algoritmos adapta su respuesta a los cambios de la red a lo largo del tiempo, es decir, la falta de disponibilidad de los telescopios o los cambios en su modelo de aceptación de la observación. Para resolver este problema, se propuso un modelo probabilístico (Apartado 5.4). En los siguientes apartados se detallan cada uno de ellos.

Por otro lado, el flujo de peticiones detallado en el apartado 4.5 puede expresarse utilizando la formulación que se ha definido en este apartado. Para tal fin se ha definido el pseudocódigo asociado a dicho flujo de peticiones (Alg. 1). Además, a lo largo de los siguientes apartados, donde se detallan los distintos algoritmos de decisión de telescopio, se muestra también el pseudocódigo asociado a los mismos (Alg. 2, 3, 4). De esta manera, a través de ellos, puede verse cómo se van formando los distintos conjuntos de telescopios que se han definido para formalizar el problema multiobjetivo planteado.

5.2. Algoritmo meteorológico

Este algoritmo de decisión tiene en cuenta sólo aspectos meteorológicos para tomar la decisión de qué telescopio ejecutará la observación. Para ello es necesario disponer de la predicción meteorológica para cada una de las ubicaciones de los telescopios.

Existen pocos proyectos libres (Ye, 2011; myweather2, 2017) que proporcionen la predicción meteorológica para una localización específica a través de interfaces de comunicación *Machine to Machine* (M2M). Para este proyecto se eligió el primero, *7timer* (Ye, 2011), ya que incluye información específica de astronomía, como puede ser el parámetro *seeing* que viene dado por la distorsión atmosférica e informa sobre la calidad del cielo en un momento determinado. Este interfaz proporciona la predicción meteorológica en un rango de tres días dividida en intervalos de tres horas. Las peticiones incluyen información sobre nubosidad, velocidad del viento, tipo de precipitación, *seeing*, etc.

El algoritmo de decisión meteorológico recibe la predicción meteorológica para cada telescopio del conjunto de telescopios que puedan ejecutar la observación, A_i , y genera el conjunto de telescopios ordenado A''_i . Cada telescopio de dicho conjunto es ordenado atendiendo a una calificación del mismo en función de las condiciones meteorológicas

Algoritmo 1: Flujo de peticiones

$A_G = \{T_1, T_2, T_3, T_4 \dots T_G\} \leftarrow$ telescopios de GLORIA;
 $T_k \in A_i'' \leftarrow$ telescopio elegido;
 $A_i \subset A_G \leftarrow$ conjunto de telescopios que pueden ejecutar la observación O_i ;
 $A_i'' \subset A_i \leftarrow$ conjunto de telescopios ordenados que pueden ejecutar O_i ;

Entradas:

$O_i \leftarrow$ petición de observación i ;
 $t \leftarrow$ restricciones temporales;
 $v \leftarrow$ restricciones de visibilidad;
 $f \leftarrow$ restricciones fijas;
 $A_i = \emptyset$

```

if conformidadFormato( $O_i$ ) then
  if  $t$  en intervalo actual then
    for  $T_j \in A_G$  do
      if satisface( $f$ ) then
         $A_i = A_i \cup T_j$ ;
      end
    end
    for  $T_j \in A_i$  do
      visibilidad = evaluarVisibilidad( $O_i$ );
      if visibilidad == false then
         $A_i = A_i \setminus T_j$ ;
      end
    end
    if  $|A_i| > 1$  then
       $T_k =$  decisionTelescopio( $A_i, O_i$ );
      ofrecerObservacion( $O_i, T_k$ );
    else if  $|A_i| = 1$  then
       $T_k = T_j \in A_i$ ;
      ofrecerObservacion( $O_i, T_k$ );
    else
      rechazar( $O_i$ );
    end
    else if  $t >$  tiempo actual then
      planificar_mas_tarde;
    else
      rechazar( $O_i$ );
    end
  else
    rechazar( $O_i$ );
  end

```

de su observatorio, previstas para el intervalo de tiempo cedido por el propietario para el uso de la red GLORIA. Finalmente, el telescopio en primera posición en el conjunto A''_i , es decir, el que haya obtenido la mejor puntuación será elegido para ejecutar la observación.

Si se tiene en cuenta la nubosidad, la visibilidad astronómica y la existencia o no de precipitación, ya sea en forma de lluvia, nieve o granizo, la fórmula para obtener la puntuación del telescopio T_j para la observación O_i se define como:

$$\phi_j^i = \left(1 - \frac{\alpha}{100}\right)\beta \quad (5.13)$$

siendo α la predicción meteorológica y β la visibilidad astronómica. Una vez definida la puntuación del telescopio, y teniendo en cuenta que ésta depende de las funciones predichas de disponibilidad de los telescopios, puede establecerse cada una de ellas. Por un lado, el parámetro base para la función predicha de la disponibilidad de los telescopios por factores meteorológicos, $\hat{m}(O_i, T_j)$, queda asociada directamente a la predicción meteorológica, α ; mientras que la disponibilidad predicha del telescopio en sí, $\hat{d}(O_i, T_j)$, ha sido considerada siempre positiva. Es decir, se supone que el telescopio siempre va a estar funcionando adecuadamente.

Con respecto a los parámetros, la predicción meteorológica es un parámetro que incluye información sobre la nubosidad y la existencia o no de precipitación en la localización del observatorio. Su rango de valores se define del 0% al 100%. Cero indica que el cielo está totalmente despejado, sin ningún tipo de precipitación ni nubes; conforme el tiempo va empeorando, este valor aumenta. Este parámetro se calcula según (5.14):

$$\alpha = 100 \frac{1}{P} \sum_{l=1}^P (1 - \delta_l) \frac{\tau_l}{10} \quad (5.14)$$

donde P es el número de intervalos de tres horas considerados en función del tiempo de disponibilidad del telescopio en cuestión; δ_l es una variable binaria cuyo valor es 0 cuando existe precipitación de cualquier tipo y 1 cuando no hay precipitación para el intervalo de tiempo l ; y τ_l es una variable entera que indica en un rango del 0 al 10 el nivel de nubosidad en el intervalo l . Estos valores son directamente obtenidos a través del interfaz M2M proporcionado por *7timer*.

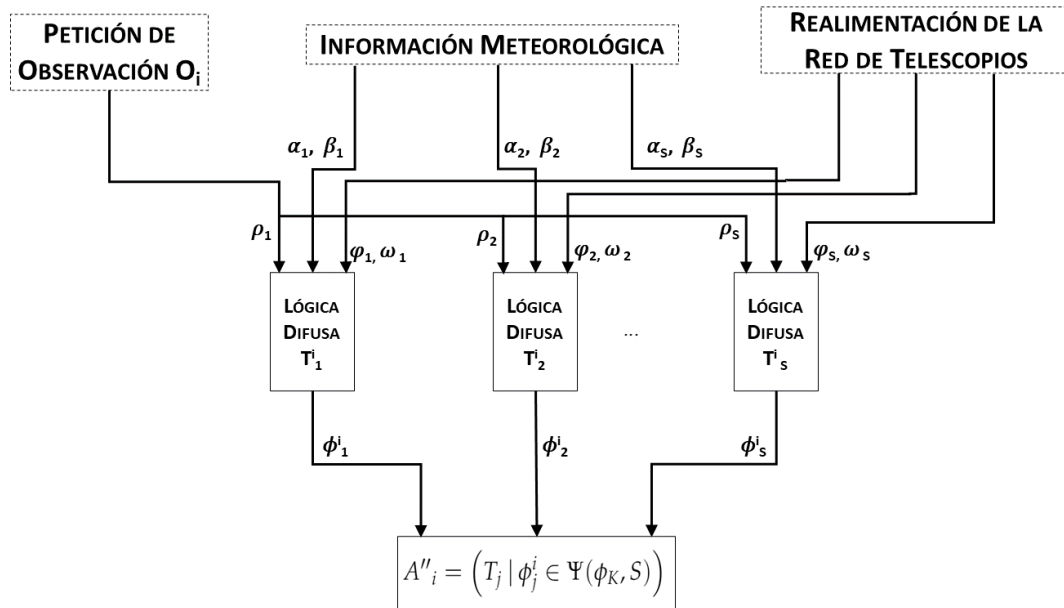


FIGURA 5.1: Esquema del algoritmo de decisión basado en lógica difusa.

El parámetro de visibilidad astronómica, β , informa sobre la transparencia en la localización del observatorio. Puede tomar valores entre el 0% y 100%, correspondiéndose el valor mayor a una mejor condición de transparencia y visibilidad en el observatorio. Este parámetro se calcula según (5.15):

$$\beta = 100 \frac{1}{P} \sum_{l=1}^P \left(1 - \frac{\xi_l}{10} \right) \quad (5.15)$$

donde ξ_l es una variable entera que indica en un rango del 1 al 10 el valor del *seeing* en el observatorio en los intervalos considerados. Conforme este valor aumenta, el *seeing* es peor. Estos valores son directamente obtenidos a través del interfaz M2M proporcionado por *7timer*.

Todo el proceso que se acaba de detallar queda reflejado en el pseudocódigo que aparece en el Alg. 2.

5.3. Algoritmo de lógica difusa

Este algoritmo de decisión utiliza un modelo de lógica difusa para generar el conjunto de telescopios ordenados, A''_i . La figura 5.1 muestra el esquema del algoritmo planteado. Tal y como se puede apreciar, se ha empleado un modelo difuso que es utilizado independientemente por cada uno de los telescopios. Este modelo tiene como entrada tres tipos

Algoritmo 2: Decisión del Telescopio según el Algoritmo Meteorológico

$A_G = \{T_1, T_2, T_3, T_4 \dots T_G\} \leftarrow$ telescopios de GLORIA;
 $T_k \in A_i'' \leftarrow$ telescopio elegido;
 $A_i \subset A_G \leftarrow$ conjunto de telescopios que pueden ejecutar la observación O_i ;
 $A_i'' \subset A_i \leftarrow$ conjunto de telescopios ordenados que pueden ejecutar O_i ;
 $\phi_k \leftarrow$ conjunto de puntuaciones de los telescopios de A_i ;
 $\phi_{temp} \leftarrow$ conjunto copia de ϕ_k ;
 $S \leftarrow$ n° de pasos máximo de reasignación;

Entradas:

$O_i \leftarrow$ petición de observación i ;
 $A_i \leftarrow$ conjunto de telescopios que pueden ejecutar la observación O_i ;

Salida :

$T_k \leftarrow$ telescopio elegido

$A_i'' = \emptyset$;
 $\phi_k = \emptyset$;
 $\Psi(\phi_K, S) = \emptyset$;

for $T_j \in A_i$ **do**

$\tau_j = obtenerNubosidad7Timer()$;
 $\delta_j = obtenerPrecipitacion7Timer()$;
 $\xi_j = obtenerSeeing7Timer()$;
 $\alpha_j = computarPrediccionMeteorologica(\tau_j, \delta_j)$;
 $\beta_j = computarVisibilidadAstronomica(\xi_j)$;
 $\phi_j^i = (1 - \frac{\alpha}{100})\beta$;
 $\phi_k = \phi_k \cup \phi_j^i$;

end

$\phi_{temp} = \phi_k$;
 $n = |A_i|$;

while $n > 0$ **do****if** $|A_i''| < S$ **then**

$\phi_l = \text{máx}(\phi_{temp})$;
 $T_l = T \in A_i \mid \phi_l^i = \phi_l$;
 $A_i'' = A_i'' \cup T_l$;
 $\Psi(\phi_K, S) = \Psi(\phi_K, S) \cup \phi_l$;
 $\phi_{temp} = \phi_{temp} \setminus T_l$;

end

$n = n - 1$;

end

$T_k = T \in A_i'' \mid \phi_k^i = \text{máx}(\Psi(\phi_K, S))$;
 $return(T_k)$;

TABLA 5.1: Tipos de parámetros.

Tipo	Variable	Descripción
Información Meteorológica	α	Predicción Meteorológica
	β	Visibilidad Astronómica
Calidad de la Observación	ρ	Altitud de Tránsito del Objeto
Parámetros de red	φ	Puntuación del usuario
	ω	Tasa de aceptación del telescopio

de parámetros (Tabla 5.1): información meteorológica, calidad de la observación del objeto e información de la red; y como salida la puntuación de cada telescopio, ϕ_j^i , para la observación O_i . Esta puntuación puede tomar valores del 0 al 100, considerándose el 100 la mejor puntuación que puede conseguir un telescopio.

Los parámetros asociados a la información meteorológica informan sobre las condiciones atmosféricas en el observatorio. Estos datos han sido obtenidos de *7timer* tal y como se ha explicado en el apartado anterior (Apartado 5.2).

El parámetro utilizado para medir la calidad es la *Altitud de Tránsito del Objeto* (ρ). Este parámetro informa sobre la máxima altitud que puede alcanzar el objeto visto desde el observatorio, en un rango de 0° a 90° . Cuanto mayor es el valor de la altitud, mejor será la observación desde la localización del observatorio ya que el objeto se observará en el zenit del telescopio. Existen distintas herramientas que permiten obtener este parámetro, en este caso se ha utilizado Libnova (Libnova, 2019).

Finalmente, hay dos parámetros de la red que se realimentan para incluir información sobre el comportamiento de los telescopios. Por un lado está la *Puntuación del usuario* (φ), en un rango del 0% al 100%. Este parámetro informa sobre la puntuación que los usuarios de la red GLORIA han dado al telescopio que ha realizado la observación. Un 0% es la puntuación más baja dada y un 100% la más alta posible. Por otro lado, también se tiene en cuenta la *Tasa de aceptación del telescopio* (ω). Este parámetro se define como el porcentaje de observaciones completadas frente al total de las ofrecidas al telescopio (0-100%).

Una vez definidos los parámetros que van a ser utilizados para calcular la puntuación del telescopio, se pueden fijar las funciones predichas de disponibilidad de los mismos. Para este algoritmo, tal y como ocurría para el algoritmo meteorológico, el parámetro base para la función predicha de la disponibilidad de los algoritmos por factores meteorológicos, $\hat{m}(O_i, T_j)$, es la predicción meteorológica, α . Sin embargo, en este algoritmo se

TABLA 5.2: Funciones miembros del modelo de lógica difusa.

	Valor	Intervalo	Tipo
α	despejado	0-10	triangular
	nuboso	0-50	triangular
	precipitación	45-100	trapezoidal
β	bajo	0-40	triangular
	medio	10-90	triangular
	alto	60-100	triangular
ω	bajo	0-60	triangular
	medio	55-83	trapezoidal
	alto	77-100	trapezoidal
ρ	bajo	0-29	triangular
	medio	27-67	trapezoidal
	alto	63-100	trapezoidal
φ	bajo	0-60	triangular
	medio	35-70	triangular
	alto	60-100	trapezoidal
ϕ_j^i	bajo	0-40	triangular
	medio	14-86	trapezoidal
	alto	64-100	trapezoidal

ha avanzado en la disponibilidad predicha del telescopio en sí, $\hat{d}(O_i, T_j)$, siendo el parámetro base de la misma la tasa de aceptación del telescopio en cuestión, ω .

El algoritmo de lógica difusa se basa en la definición de una serie de reglas lógicas que relacionan entradas con salidas a través de un conjunto de variables que atiende a criterios de significado y no de magnitud (Trillas and Eciolaza, 2015). Para esto, se han definido los elementos que aparecen en la tabla 5.2 en base a los parámetros anteriores.

Las reglas que gobiernan el funcionamiento del modelo difuso se definen a través de sentencias *if-then*. La parte '*if*' establece los criterios de la variable de entrada, mientras que la parte '*then*' establece el valor de la variable de salida de acuerdo con esos criterios.

Debido al elevado número de parámetros de entrada, el número de reglas lógicas han sido reducidas tomando como valor de entrada clave la predicción meteorológica. Si ésta no es adecuada en la localización del telescopio, el sistema de control, previsiblemente, hará que el telescopio esté cerrado y por tanto cualquier observación enviada al mismo no se ejecutará. Por tanto, el número de parámetros de entrada a tener en cuenta en las reglas depende altamente del valor de la predicción meteorológica (5.16).

$$IF \alpha = precipitación THEN \phi_j^i = bajo \quad (5.16)$$

Conforme la predicción mejora, pero sin llegar a estar despejado del todo, las reglas del algoritmo incluyen información sobre el resto de parámetros, a excepción del parámetro visibilidad astronómica que sólo es relevante cuando el tiempo está despejado (5.17).

$$\begin{aligned}
 IF \alpha = \textit{nuboso} \textit{ AND } \omega \\
 \textit{ AND } \rho \\
 \textit{ AND } \varphi \\
 THEN \phi_j^i
 \end{aligned} \tag{5.17}$$

La tabla 5.3 resume el rango de puntuación de los telescopios en este caso. Cabe destacar que el guión indica que la entrada podría tomar cualquier valor del conjunto difuso.

TABLA 5.3: Puntuación de los telescopios con predicción nubosa

ω	ρ	φ	ϕ_j^i
-	bajo	-	bajo
medio/alto	alto	medio/alto	medio

Finalmente cuando la predicción meteorológica es despejada, la información del parámetro visibilidad astronómica es incluido (5.18). En la tabla 5.4 aparece el resumen de las puntuaciones para este caso.

$$\begin{aligned}
 IF \alpha = \textit{despejado} \textit{ AND } \omega \\
 \textit{ AND } \rho \\
 \textit{ AND } \varphi \\
 \textit{ AND } \beta \\
 THEN \phi_j^i
 \end{aligned} \tag{5.18}$$

La figura 5.2 muestra el comportamiento del modelo de lógica difusa, relacionando la predicción meteorológica con la tasa de aceptación del telescopio (figura 5.2a) y la altitud de tránsito del objeto (figura 5.2b). Como se puede apreciar en la figura 5.2a, la valoración del telescopio aumenta conforme ω se incrementa, siempre y cuando el valor de α decrezca, es decir, conforme mejor tiempo haga. De la misma manera, en la figura



TABLA 5.4: Puntuación de los telescopios con predicción despejada

ω	ρ	φ	β	ϕ_j^i
medio	medio	medio	medio/alto	medio
medio/alto	alto	medio/alto	medio/alto	alto
alto	medio/alto	medio/alto	medio/alto	alto
medio/alto	medio/alto	alto	medio/alto	alto
-	bajo	-	medio/alto	bajo
bajo	-	-	medio/alto	bajo
-	-	bajo	medio/alto	bajo
alto	alto	alto	bajo	medio
medio/alto	medio/alto	medio/alto	bajo	bajo

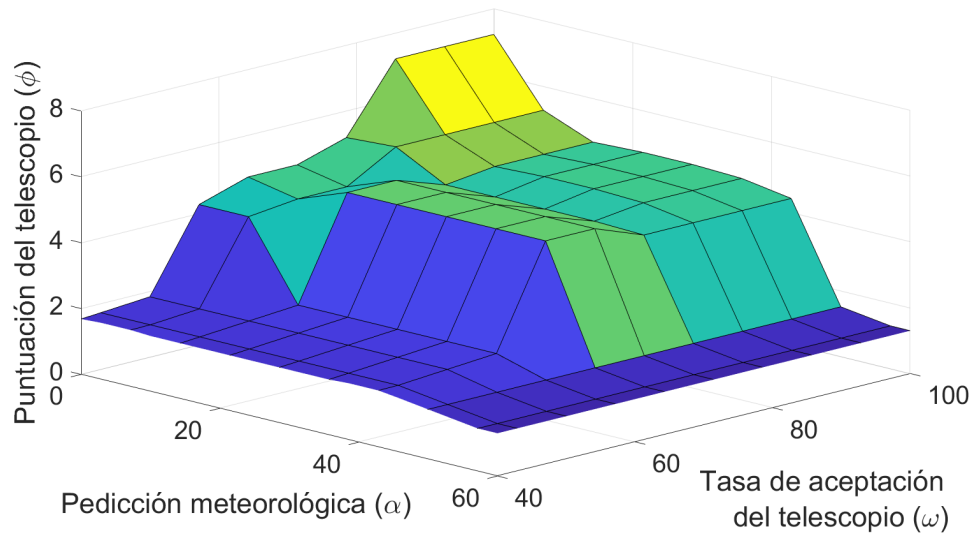
5.2b se puede observar como en valores de ρ cercanas a 90° , la valoración del telescopio alcanza el máximo cuando α se aproxima a cero.

Al igual que en el algoritmo meteorológico, todo el proceso que se acaba de detallar queda reflejado en el pseudocódigo que aparece en el Alg. 3.

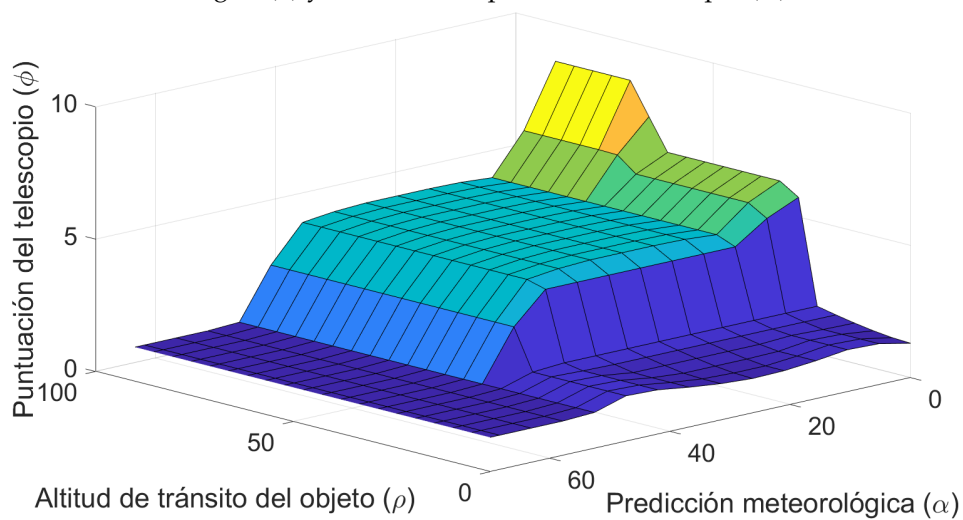
5.4. Algoritmo probabilístico

El algoritmo probabilístico se basa en modificar el algoritmo de lógica difusa para que su comportamiento se adapte a los cambios que se produzcan, en cualquiera de los telescopios de la red, con respecto a la forma en que se aceptan las observaciones. El algoritmo de lógica difusa utiliza cinco parámetros de entrada como se ha visto en el apartado 5.3. De estos parámetros de entrada, sólo dos están relacionados con variables externas que pueden cambiar el funcionamiento del telescopio. Estos parámetros son la predicción meteorológica (α) y la visibilidad astronómica (β). Por lo tanto, estos parámetros se utilizarán para ajustar la respuesta del algoritmo probabilístico.

En lugar de utilizar directamente estas variables como entradas en el modelo de lógica difusa, se utiliza la probabilidad condicional de que se acepte una observación (η) por cada telescopio, dado un par específico de valores para las variables de predicción y visibilidad astronómica, $P(\eta|\alpha, \beta)$. De esta manera, el algoritmo se divide en dos partes para cada telescopio: la predicción de la probabilidad condicional basada en la información adquirida de la red y un modelo de lógica difusa que finalmente puntúa el telescopio y genera el conjunto ordenado A''_i . Los telescopios de dicho conjunto están ordenados según su puntuación y el de mayor puntuación es el que finalmente ejecutará la observación.



(a) Puntuación del telescopio en función de las variables de entrada Predicción meteorológica (α) y la Tasa de aceptación del telescopio (ω)



(b) Puntuación del telescopio en función de las variables de entrada Predicción meteorológica (α) y la Altitud de tránsito del objeto (ρ)

FIGURA 5.2: Representación de la variable Puntuación del Telescopio (ϕ_j^i).

Algoritmo 3: Decisión del Telescopio según el Algoritmo de Lógica Difusa

$A_G = \{T_1, T_2, T_3, T_4 \dots T_G\} \leftarrow$ telescopios de GLORIA;
 $T_k \in A_i'' \leftarrow$ telescopio elegido;
 $A_i \subset A_G \leftarrow$ conjunto de telescopios que pueden ejecutar la observación O_i ;
 $A_i'' \subset A_i \leftarrow$ conjunto de telescopios ordenados que pueden ejecutar O_i ;
 $\phi_k \leftarrow$ conjunto de puntuaciones de los telescopios de A_i ;
 $\phi_{temp} \leftarrow$ conjunto copia de ϕ_k ;
 $S \leftarrow$ n° de pasos máximo de reasignación;

Entradas:

$O_i \leftarrow$ petición de observación i ;
 $A_i \leftarrow$ conjunto de telescopios que pueden ejecutar la observación O_i ;

Salida :

$T_k \leftarrow$ telescopio elegido

$A_i'' = \emptyset$;
 $\phi_k = \emptyset$;
 $\Psi(\phi_K, S) = \emptyset$;

for $T_j \in A_i$ **do**

$\tau_j = \text{obtenerNubosidad7Timer}()$;
 $\delta_j = \text{obtenerPrecipitacion7Timer}()$;
 $\xi_j = \text{obtenerSeeing7Timer}()$;
 $\alpha_j = \text{computarPrediccionMeteorologica}(\tau_j, \delta_j)$;
 $\beta_j = \text{computarVisibilidadAstronomica}(\xi)$;
 $\rho_j = \text{obtenerAltitudTransitoObjeto}(0_i)$;
 $\varphi_j = \text{obtenerPuntuacionUsuario}(T_j)$;
 $\omega_j = \text{obtenerTasaAceptacin}(T_j)$;
 $\phi_j^i = \text{evaluarLogicaDifusa}(\alpha_j, \beta_j, \rho_j, \varphi_j, \omega_j)$;
 $\phi_k = \phi_k \cup \phi_j^i$;

end

$\phi_{temp} = \phi_k$;
 $n = |A_i|$;

while $n > 0$ **do**

if $|A_i''| < S$ **then**
 $\phi_l = \text{máx}(\phi_{temp})$;
 $T_l = T \in A_i \mid \phi_l^i = \phi_l$;
 $A_i'' = A_i'' \cup T_l$;
 $\Psi(\phi_K, S) = \Psi(\phi_K, S) \cup \phi_l$;
 $\phi_{temp} = \phi_{temp} \setminus T_l$;

end

$n = n - 1$;

end

$T_k = T \in A_i'' \mid \phi_k^i = \text{máx}(\Psi(\phi_K, S))$;
 $\text{return}(T_k)$;

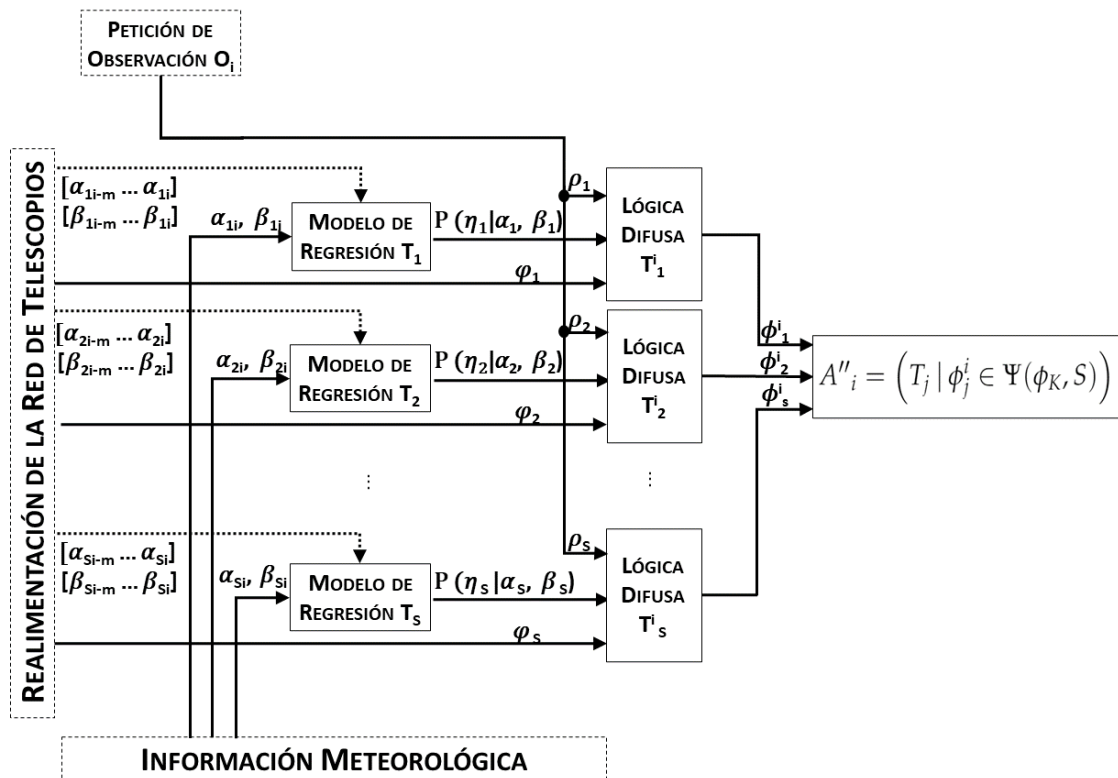


FIGURA 5.3: Esquema del algoritmo de decisión probabilístico.

De nuevo, una vez definidos los parámetros que van a ser utilizados para calcular la puntuación del telescopio, se pueden fijar las funciones predichas de disponibilidad de los mismos. En este algoritmo, a diferencia de en los dos anteriores, el parámetro base para la función predicha de la disponibilidad de los algoritmos por factores meteorológicos, $\hat{m}(O_i, T_j)$, es la probabilidad de aceptación de una observación en función de la predicción meteorológica y de la visibilidad astronómica, $P(\eta | \alpha, \beta)$. En cuanto a disponibilidad predicha del telescopio en sí, $\hat{d}(O_i, T_j)$, se mantiene como parámetro base de la misma la tasa de aceptación del telescopio en cuestión, ω , al igual que en el algoritmo de lógica difusa.

La predicción de la probabilidad condicional se obtiene mediante un modelo de regresión lineal generalizada. Este tipo de modelos establece una relación entre una variable de respuesta y uno o más predictores. La variable de respuesta se asume que es una distribución particular dentro de la familia de distribución exponencial (Fox, 2015). En este caso se establece una relación entre una variable de respuesta y dos predictores. La variable de respuesta es la aceptación o no de una solicitud de observación dada, η , es decir, $\eta \in \{0, 1\}$ por lo que se asume una distribución de Bernoulli. Por otro lado, el

predictor bivariable está compuesto por la predicción meteorológica, α , y la visibilidad astronómica, β . Por lo tanto, este modelo queda definido por:

$$\text{logit}(\mu) = \log\left(\frac{\mu}{1-\mu}\right) = a + b \cdot \alpha + c \cdot \beta \quad (5.19)$$

donde μ es la respuesta media del modelo a la predicción meteorológica dada, α y la visibilidad astronómica β ; y a , b y c son los parámetros de regresión lineal generalizada del modelo que se han estimado. Es decir, μ es directamente la probabilidad condicional necesaria en el algoritmo probabilístico $P(\eta|\alpha, \beta) = \mu$.

Este modelo se ajusta a los datos proporcionados por la ejecución continua de la red, de forma que pueda adaptarse a los cambios producidos en su comportamiento. La actualización del modelo de regresión se realiza a través de una técnica de ventana deslizante para hacer las transiciones gradualmente.

La probabilidad condicional se utiliza entonces como entrada en un modelo difuso que también tiene como entradas la altitud de tránsito de destino, ρ , y la puntuación de usuario, φ .

El modelo difuso, como ya se ha visto en el apartado 5.3 se basa en la definición de un conjunto de reglas que conectan las variables de entrada con las de salida. En la tabla 5.5, se muestran las diferentes funciones de pertenencia utilizadas para definir correctamente las variables difusas.

TABLA 5.5: Funciones de pertenencia del modelo difuso.

	Valor	Intervalo	Tipo
$P(\eta \alpha, \beta)$	bajo	0-35	triangular
	medio	10-90	triangular
	alto	60-100	triangular
Altitud de tránsito del objeto (ρ)	bajo	0-29	triangular
	medio	27-67	trapezoidal
	alto	63-100	trapezoidal
Puntuación de usuario (φ)	bajo	0-60	triangular
	medio	35-70	triangular
	alto	60-100	trapezoidal
Puntuación del telescopio (ϕ_j^i)	bajo	0-40	triangular
	medio	14-86	trapezoidal
	alto	64-100	trapezoidal



La regla difusa que establece el comportamiento del modelo se define en la ecuación (5.20):

$$\begin{array}{l}
 \text{IF } P(\eta|\alpha, \beta) \text{ AND } \rho \\
 \text{AND } \varphi \\
 \text{THEN } \phi_j^i
 \end{array} \tag{5.20}$$

La tabla 5.6 resume la puntuación del telescopio según el conjunto de reglas difusas previamente definidas. Debe tenerse en cuenta que el guión indica que la variable puede tomar cualquiera de los valores dentro del conjunto difuso.

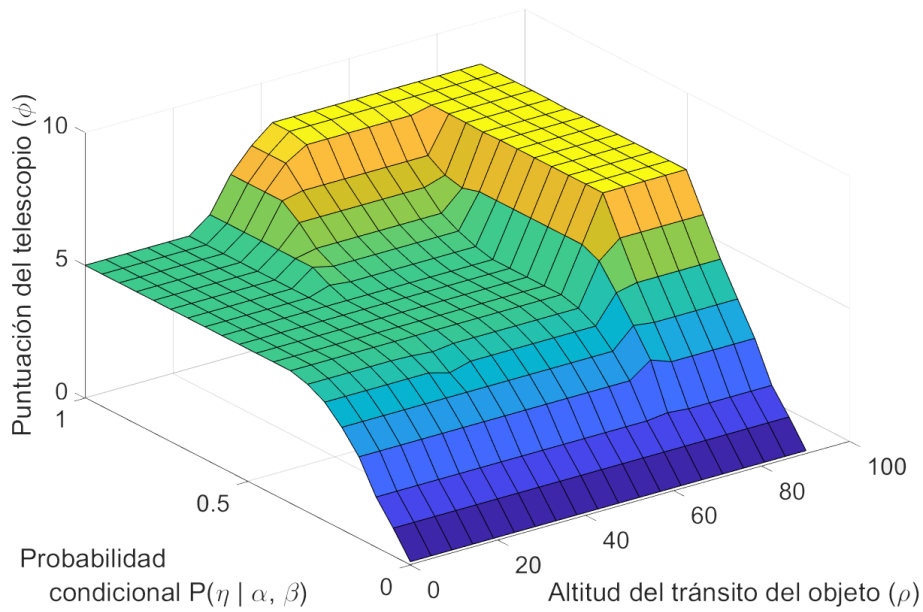
TABLA 5.6: Puntuación del telescopio

$P(\eta \alpha, \beta)$	ρ	φ	ϕ_j^i
bajo	-	-	bajo
medio	bajo	bajo	bajo
medio	alto	medio/alto	alto
medio	bajo	alto	medio
medio	medio/alto	bajo	medio
medio	bajo/medio	medio	medio
alto	-	medio/alto	alto
alto	bajo/medio	bajo	medio
alto	alto	bajo	alto

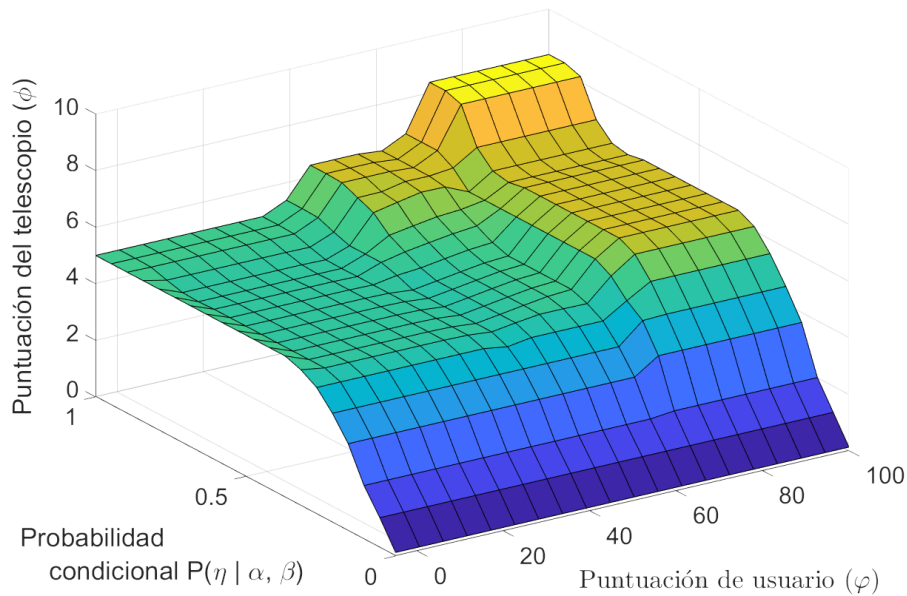
La figura 5.4 muestra el comportamiento del modelo de lógica difusa, relacionando la probabilidad condicional con la altitud de tránsito del objeto a observar (figura 5.4a) y la puntuación del usuario (figura 5.4b). Como se puede apreciar en la figura 5.4a, la valoración del telescopio aumenta conforme la probabilidad condicional se incrementa, siempre y cuando el valor de ρ sea cercano a 90° . De la misma manera, en la figura 5.4b se puede observar como en valores de φ cercanas a 100, la valoración del telescopio alcanza el máximo cuando la probabilidad condicional se aproxima a uno.

Como en los casos anteriores, todo el proceso que se acaba de detallar queda reflejado en el pseudocódigo que aparece en el Alg. 4.





(a) Representación de la variable Puntuación del Telescopio (ϕ_j^i) en función de las variables de entrada Probabilidad condicional, $P(\eta|\alpha, \beta)$ y la Altitud de tránsito del objeto (ρ)



(b) Representación de la variable Puntuación del Telescopio (ϕ_j^i) en función de las variables de entrada Probabilidad condicional, $P(\eta|\alpha, \beta)$ y la Puntuación de usuario (φ).

FIGURA 5.4: Representación de la variable Puntuación del Telescopio (ϕ_j^i).

Algoritmo 4: Decisión del Telescopio según el Algoritmo Probabilístico

$A_G = \{T_1, T_2, T_3, T_4 \dots T_G\} \leftarrow$ telescopios de GLORIA;
 $T_k \in A_i'' \leftarrow$ telescopio elegido;
 $A_i \subset A_G \leftarrow$ conjunto de telescopios que pueden ejecutar la observación O_i ;
 $A_i'' \subset A_i \leftarrow$ conjunto de telescopios ordenados que pueden ejecutar O_i ;
 $\phi_k \leftarrow$ conjunto de puntuaciones de los telescopios de A_i ;
 $\phi_{temp} \leftarrow$ conjunto copia de ϕ_k ;
 $S \leftarrow$ n° de pasos máximo de reasignación;

Entradas:

$O_i \leftarrow$ petición de observación i ;
 $A_i \leftarrow$ conjunto de telescopios que pueden ejecutar la observación O_i ;

Salida :

$T_k \leftarrow$ telescopio elegido

$A_i'' = \emptyset$;

$\phi_k = \emptyset$;

$\Psi(\phi_k, S) = \emptyset$;

for $T_j \in A_i$ **do**

$\tau_j = \text{obtenerNubosidad7Timer}()$;

$\delta_j = \text{obtenerPrecipitacion7Timer}()$;

$\xi_j = \text{obtenerSeeing7Timer}()$;

$\alpha_j = \text{computarPrediccionMeteorologica}(\tau_j, \delta_j)$;

$\beta_j = \text{computarVisibilidadAstronomica}(\xi)$;

$P(\eta_j | \alpha_j, \beta_j) = \text{obtenerProbabilidadModeloRegresion}(\alpha_j, \beta_j)$;

$\rho_j = \text{obtenerAltitudTransitoObjeto}(O_i)$;

$\varphi_j = \text{obtenerPuntuacionUsuario}(T_j)$;

$\phi_j^i = \text{evaluarLogicaDifusa}(P(\eta_j | \alpha_j, \beta_j), \rho_j, \varphi_j)$;

$\phi_k = \phi_k \cup \phi_j^i$;

end

$\phi_{temp} = \phi_k$;

$n = |A_i|$;

while $n > 0$ **do**

if $|A_i''| < S$ **then**

$\phi_l = \text{máx}(\phi_{temp})$;

$T_l = T \in A_i \mid \phi_l^i = \phi_l$;

$A_i'' = A_i'' \cup T_l$;

$\Psi(\phi_k, S) = \Psi(\phi_k, S) \cup \phi_l$;

$\phi_{temp} = \phi_{temp} \setminus T_l$;

end

$n = n - 1$;

end

$T_k = T \in A_i'' \mid \phi_k^i = \text{máx}(\Psi(\phi_k, S))$;

$\text{return}(T_k)$;

5.5. Discusión

Los algoritmos que se han detallado en apartados anteriores deciden a qué telescopio ofrecer una observación concreta. Para tomar esta decisión, los algoritmos predicen la disponibilidad de los distintos telescopios, puntuándolos y ordenándolos según dicha predicción. En concreto, predicen la disponibilidad de los mismos por factores meteorológicos, $\hat{m}(O_i, T_j)$, y la disponibilidad por el telescopio en sí, $\hat{d}(O_i, T_j)$. De esta manera, y tal como se mostró en el apartado 5.1, se mejoran la tasa de aceptación y el número de pasos máximo predichos con respecto a sus valores teóricos (ecuaciones 5.9 y 5.11).

En la tabla 5.7 aparecen los distintos algoritmos que se han definido y el parámetro base de dicho algoritmo asociado a cada una de las funciones a predecir (\hat{m}, \hat{d}). Puede observarse como la complejidad de la predicción aumenta con el tipo de algoritmo utilizado. En concreto, para la predicción de la disponibilidad por factores meteorológicos se ve cómo para los algoritmos meteorológico y de lógica difusa depende de la predicción meteorológica, α ; mientras que para el algoritmo probabilístico se utiliza la probabilidad de aceptación de una observación en función de la predicción meteorológica y de la visibilidad astronómica, $P(\eta|\alpha, \beta)$. En cuanto a la predicción de la disponibilidad del telescopio, se supone siempre disponible en el caso del algoritmo meteorológico mientras que para los otros dos algoritmos depende de la tasa de aceptación de observaciones por telescopio.

TABLA 5.7: Relación entre los parámetros de los algoritmos de decisión y las funciones de disponibilidad.

	Alg. Meteorológico	Alg. Lógica Difusa	Alg. Probabilístico
\hat{m}	α	α	$P(\eta \alpha, \beta)$
\hat{d}	1	ω	ω

Estos parámetros no constituyen las funciones en sí, puesto que éstas devuelven un valor binario, $\{1,0\}$ y los parámetros indicados abarcan una serie de valores continuos. La manera en el que los distintos algoritmos tratan estas variables impiden definir un umbral que indique que la predicción es positiva (1), o negativa (0). La forma de definir las es a través del conjunto de telescopios que mejor puntuación ha obtenido, A''_i . Por tanto, estas funciones quedan definidas como:

$$\hat{m}(O_i, T_j) = \begin{cases} 0, & \text{si } T_j \notin A''_i \\ 1, & \text{si } T_j \in A''_i \end{cases} \quad (5.21)$$

$$\hat{d}(O_i, T_j) = \begin{cases} 0, & \text{si } T_j \notin A''_i \\ 1, & \text{si } T_j \in A''_i \end{cases} \quad (5.22)$$

5.6. Conclusiones

En este capítulo se ha planteado el problema de optimización multiobjetivo que hay que resolver para optimizar el funcionamiento del planificador diseñado.

Para el caso de la red GLORIA, debido a que cada telescopio posee un sistema de control distinto y un planificador local propio, el momento exacto en el que se ejecuta la observación no puede ser controlado por la red. Por tanto, para evitar ofrecer la observación a un telescopio que finalmente no pueda ejecutarla, se han definido tres algoritmos que optimizan la decisión. Estos algoritmos predicen la disponibilidad de los telescopios por factores meteorológicos y propios, mejorando de esta manera la tasa de aceptación de observaciones y disminuyendo el número de pasos totales hasta que la observación es finalmente ejecutada o descartada.

El primer algoritmo diseñado se basa únicamente en la predicción meteorológica en la ubicación del observatorio. Para ello se computa matemáticamente una puntuación que sólo tiene en cuenta dicha información. El segundo incluye además información sobre la calidad de la observación en los distintos observatorios e información sobre el comportamiento de la red. La manera de obtener la puntuación de cada telescopio es a través de un algoritmo de lógica difusa que tenga en cuenta todos los parámetros. Finalmente, para poder adaptar el algoritmo de decisión a los cambios que se puedan producir en la red, se diseñó un algoritmo probabilístico basado en un modelo de regresión lineal generalizado. En el capítulo 7 se muestran los resultados obtenidos con el uso de cada uno de los algoritmos, así como una comparativa de los mismos.



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

Capítulo 6

Modelo de la red GLORIA

6.1. Introducción

Como se ha visto en los capítulos anteriores, el módulo clave dentro del planificador de GLORIA es el algoritmo de decisión del telescopio. Su objetivo, tal y como se detalló en el capítulo 4, es elegir un telescopio que realmente ejecute la observación. De manera que, cuanto mejor se tome la decisión, mejor será el rendimiento general del planificador, ya que se minimizará el tiempo de ejecución y se aumentará la tasa de aceptación total.

Para poder realizar un análisis comparativo más exacto de cada algoritmo de decisión, es necesario implantar cada uno de ellos bajo las mismas condiciones, es decir, la meteorología debería ser la misma para cada telescopio, así como la disponibilidad de cada uno de ellos. Debido a que esto es imposible de realizar en la práctica, se ha desarrollado un entorno de simulación utilizando un modelo de la red GLORIA basado en eventos discretos. El parámetro a analizar en este modelo es la tasa de aceptación global de la red, por lo que el modelo de la red GLORIA se ha realizado teniendo en cuenta esta consideración.

El modelo de la red puede considerarse como un sistema de eventos discretos, donde la recepción de una solicitud de observación es el evento que hace que el sistema evolucione de un estado a otro: de estado inactivo a estado de procesamiento. Y la solicitud de observación en sí misma es la entidad del sistema que solicita un servicio de las diferentes partes del sistema a lo largo de su recorrido (Cassandras and Lafortune, 2008). Para crear el modelo de las diferentes partes de la red, se han utilizado los datos producidos por la red real de GLORIA.



En la figura 6.1 aparece el modelo de red que se ha diseñado. Está compuesto por dos partes principalmente: el planificador de la red GLORIA y el conjunto de telescopios. Posee unos parámetros de entrada necesarios para ejecutar adecuadamente las simulaciones. En el modelo, las líneas sólidas representan el camino que sigue la petición de observación desde que es solicitada por el usuario. Las líneas a rayas representan los datos de entrada: la predicción meteorológica, la visibilidad astronómica, la puntuación del usuario, la altitud de tránsito y el porcentaje de aceptación del telescopio. Por último, las líneas punteadas representan información interna necesaria para el buen funcionamiento de todo el sistema modelado.

A continuación se van a detallar cada uno de los bloques que componen el modelo. Los bloques han sido divididos en cuatro grupos: bloques asociados al procesamiento de los datos de entrada, bloques asociados al planificador, bloques del telescopio y bloques de realimentación.

6.2. Procesamiento de parámetros de entrada

Antes del modelo del planificador en sí, existen una serie de bloques que generan las entidades asociadas a cada una de las observaciones. Además, proporcionan toda la información que será necesaria en el mismo.

Dentro de este grupo de bloques se encuentran los bloques: 'Usuario', 'Petición de Observación', 'Análisis de la Petición', 'Información meteorológica' y 'Combinador de Peticiones de Observación'.

■ Bloque Usuario

Este bloque engloba todas aquellas acciones que son generadas por el usuario. En este caso, dos: generar observaciones y generar la puntuación del usuario asociada a las observaciones completadas satisfactoriamente.

Como se ha indicado anteriormente, cada petición de observación generada por el usuario es modelada como una entidad. Además, el elemento que las genera permite establecer la tasa de generación de las mismas.

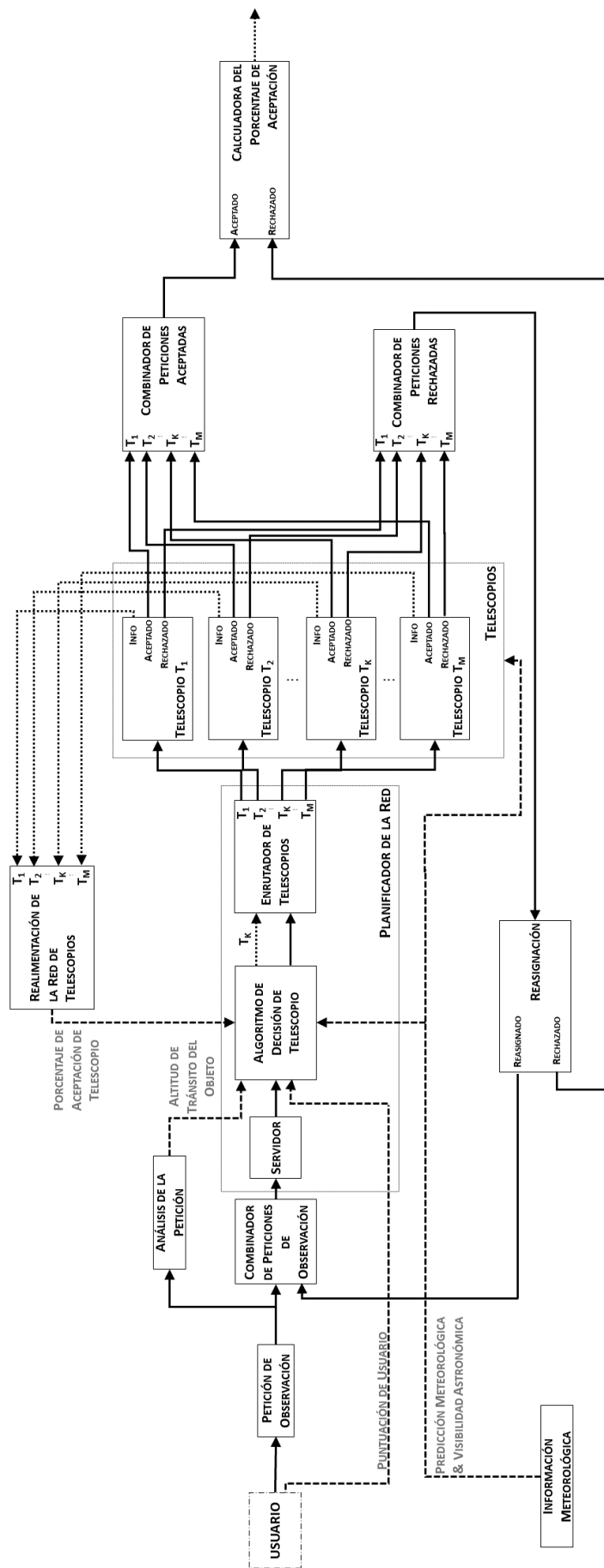


FIGURA 6.1: Modelo de la red GLORIA dividido en tres partes principalmente: el planificador, los telescopios y los parámetros de entrada. Las líneas sólidas representan el camino que la petición de observación sigue desde que es solicitada por el usuario. Las líneas a rayas representan los datos de entrada. Por último, las líneas punteadas representan información interna.

La puntuación del usuario, que será utilizada por los algoritmos de decisión del telescopio, ha sido modelada como una variable uniformemente distribuida con límites entre 0 y 10 puntos. Correspondiéndose estos valores con los límites de puntuación permitidos a los usuarios a la hora de valorar la imagen obtenida. Su función de distribución de probabilidad queda definida como:

$$\Phi_{\text{petición usuario}}(x) = \begin{cases} 0, & \text{si } x < 0 \\ \frac{x}{10}, & \text{si } 0 \leq x < 10 \\ 1, & \text{si } x \geq 10 \end{cases} \quad (6.1)$$

■ Bloque Petición de Observación

Este bloque asigna una serie de atributos a cada una de las entidades generadas por el bloque 'Usuario'. Por un lado, se establece el número máximo de reasignaciones que se pueden realizar antes de considerar una observación como no completada. Este valor es el mismo para todas las observaciones que se generan.

Por otro lado, se asigna la lista de telescopios disponibles para cada petición de observación, es decir, los telescopios que cumplen con todas las restricciones especificadas por el usuario. Este conjunto de telescopios se ha modelado a través de dos variables aleatorias: la primera, establece el número de telescopios disponibles por petición, y la segunda, especifica el identificador de cada uno de esos telescopios. Ambas variables obtienen valores enteros aleatorios a partir de una distribución uniforme discreta.

Si el número de telescopios disponibles queda definido en el rango $[1, n]$, y x es un número entero dentro de ese intervalo, la función de distribución se define cómo:

$$\Phi_{\text{numTelescopios}}(x) = \frac{x}{n} \quad (6.2)$$

Para un número determinado de telescopios k , obtenidos según la función de distribución 6.2, los identificadores enteros que los definen siguen la siguiente distribución de probabilidad:

$$\Phi_{idTelescopios}(x) = \frac{x - a + 1}{b - a + 1} \quad (6.3)$$

siendo $[a, b]$ el intervalo de enteros que componen todos los identificadores de los telescopios.

■ Análisis de la Petición

En este bloque se modela el parámetro de altitud de tránsito del objeto asociado a cada entidad. Esta variable informa sobre la altitud máxima que el objeto puede alcanzar desde una ubicación específica. Toma valores de 30° a 90° , siendo 30° la altitud mínima aceptable configurada en la red GLORIA real. Esta variable ha sido modelada a través de una distribución uniforme con límites en estos dos valores.

$$\Phi_{altitud Tránsito}(x) = \begin{cases} 0, & \text{si } x < 30 \\ \frac{x-30}{90-30}, & \text{si } 30 \leq x < 90 \\ 1, & \text{si } x \geq 90 \end{cases} \quad (6.4)$$

■ Información Meteorológica

Este bloque proporciona los dos datos meteorológicos que son necesarios para la decisión del telescopio que finalmente ejecutará la observación.

Los modelos relacionados con los dos datos meteorológicos, la predicción meteorológica y la visibilidad astronómica, se calculan utilizando el histórico de datos adquiridos directamente de la red GLORIA. Es decir, durante un período de tiempo se estuvieron almacenando los datos de predicción meteorológica y visibilidad astronómica en los distintos observatorios para posteriormente poder modelar su comportamiento.

Tal y como se explicó en el apartado 5.2, la variable de predicción meteorológica incluye información sobre la cobertura nubosa y el tipo de precipitación. Toma valores entre 0 y 100; el valor cero significa que el clima está despejado, sin nubes ni precipitaciones. A medida que el tiempo empeora, el valor aumenta. Por otro lado, la variable de visibilidad se calcula a partir de los datos de *seeing* que informan sobre la transparencia astronómica. Su rango es también de 0-100, cuanto mayor sea este valor, mejor será la condición de transparencia en el observatorio.



Ambas variables se han modelado como una distribución normal aplicando el teorema del límite central. Para obtener las diferentes distribuciones normales se han utilizado los datos adquiridos de la red, obteniendo para cada caso la media y la desviación estándar de los mismos. Parámetros que definen la distribución normal que los modela.

Para un conjunto de datos aleatorios, B , compuesto de N observaciones escalares, la media queda definida como:

$$media = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N B_i \quad (6.5)$$

De igual modo, la desviación estándar para el mismo conjunto de datos se define como:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N |B_i - media|^2} \quad (6.6)$$

Una vez obtenidos estos dos valores, la función de distribución normal queda definida como:

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(u-\mu)^2}{2\sigma^2}} du \quad (6.7)$$

La figura 6.2 compara los modelos meteorológicos obtenidos para dos telescopios de la red GLORIA, con el histograma de los datos reales recogidos de la red. A la derecha de la figura aparecen los datos asociados a la predicción meteorológica y a la izquierda los correspondientes al parámetro de visibilidad astronómica. Los histogramas (barras azules en la figura) han sido normalizados para que representen una estimación de la función de densidad de probabilidad y así poder ser mejor comparados con el modelo obtenido (línea roja).

■ Combinador de Peticiones de Observación

En este bloque se combinan las entidades que se acaban de generar con las que provienen del proceso de reasignación y deben ser de nuevo procesadas por el planificador. Este bloque, por tanto, acepta entidades proveniente de dos puertos distintos y las encamina a través de un único puerto de salida.

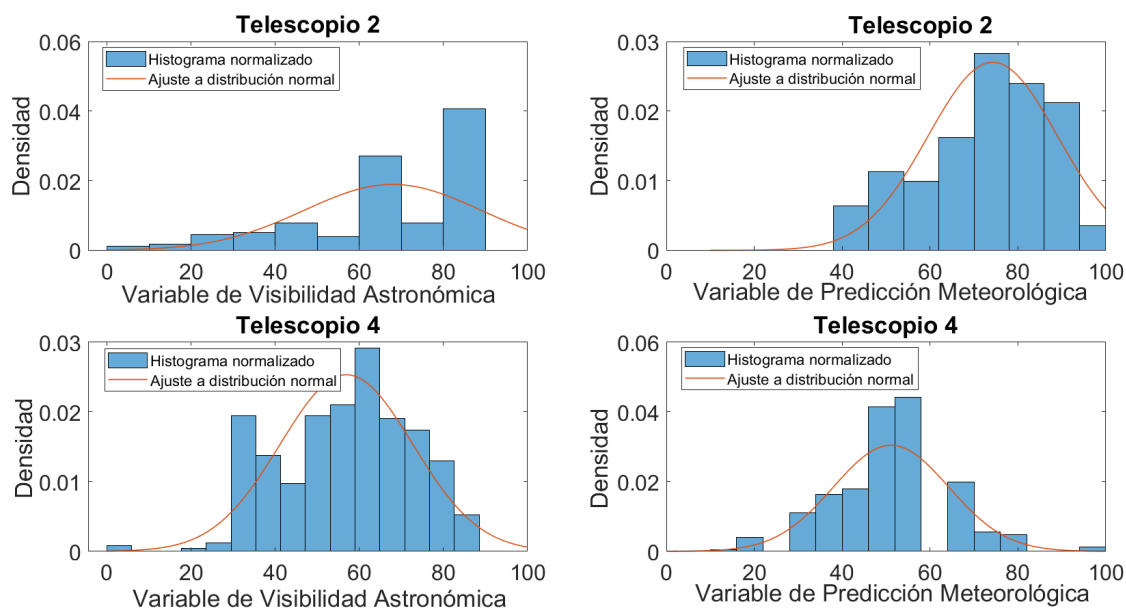


FIGURA 6.2: Comparación entre el modelo y el histograma real para los parámetros de información meteorológica de dos telescopios de la red GLORIA.

6.3. Planificador de la red

El modelo del planificador incluye 3 bloques distintos cuya función es la de encaminar cada entidad al telescopio seleccionado por el algoritmo de decisión. Estos bloques son: el 'Servidor', el 'Algoritmo de Decisión de Telescopio' y el 'Enrutador de Telescopios'.

■ Servidor

Éste es el primer bloque que aparece en el planificador y se encarga de encaminar las entidades hacia el bloque que implementa el algoritmo de decisión.

Este bloque encamina las entidades por su puerto de salida siempre que éste no esté bloqueado. Si esto ocurre, las entidades permanecen en el servidor hasta que la salida se desbloquea. El bloqueo de una salida puede ocurrir cuando el bloque siguiente está procesando una entidad y no puede recibir ninguna más.

■ Algoritmo de Decisión de Telescopio

El bloque 'Algoritmo de Decisión' implementa los distintos algoritmos que se han visto en el capítulo 6.

Como puede verse en la figura 6.1, este bloque recibe no sólo la entidad correspondiente sino una serie de parámetros de entrada. En concreto, necesita información proveniente de los bloques 'Usuario', 'Información Meteorológica', 'Análisis de la

Petición' y 'Realimentación de la Red de Telescopios'. Dependiendo del tipo de algoritmo de decisión que se esté simulando utilizará toda o parte de la información que le llega.

De la entidad, el algoritmo necesita recuperar el atributo asociado a la lista de telescopios que pueden ejecutar la observación, para así poder elegir uno de ellos.

Este bloque tiene como salida la entidad que acaba de procesar y el identificador del telescopio seleccionado para ejecutar la observación.

■ Enrutador de Telescopios

Este bloque se encarga de encaminar la entidad al telescopio seleccionado por el algoritmo de decisión. Para ello, encamina la entidad a uno de sus puertos de salida dependiendo del valor del parámetro que hay a su entrada. En este caso, el parámetro de entrada es el identificador del telescopio.

6.4. Telescopio

Los bloques que componen el modelo de cada uno de los telescopios de la red aparece en la figura 6.3. Como se puede observar está compuesto por un servidor, un bloque que decide si aceptar o no las observaciones que recibe y finalmente un bloque enrutador que separa las entidades en aquellas que han sido aceptadas y en las que no.

Junto con estos bloques, el modelo de los telescopios prepara la información que será utilizada en la realimentación de la red. En concreto, va calculando la tasa de aceptación del telescopio y para cada entidad empaqueta una 3-tupla $(\eta \in \{0,1\}, \alpha, \beta)$ con la siguiente información: la predicción atmosférica, α , y la visibilidad astronómica, β , proporcionadas por el modelo de Información Atmosférica; y la aceptación o no de la observación, η , dados esos valores meteorológicos.

■ Servidor

Este bloque se encarga de proporcionar las entidades al bloque siguiente. Éstas se mantendrán en espera si el puerto de salida está bloqueado porque la entidad anterior aún no ha finalizado su proceso en el bloque posterior. Incluye también un parámetro asociado al tiempo de servicio de cada entidad que entra. El tiempo que se ha configurado en cada telescopio es el asociado al tiempo medio transcurrido

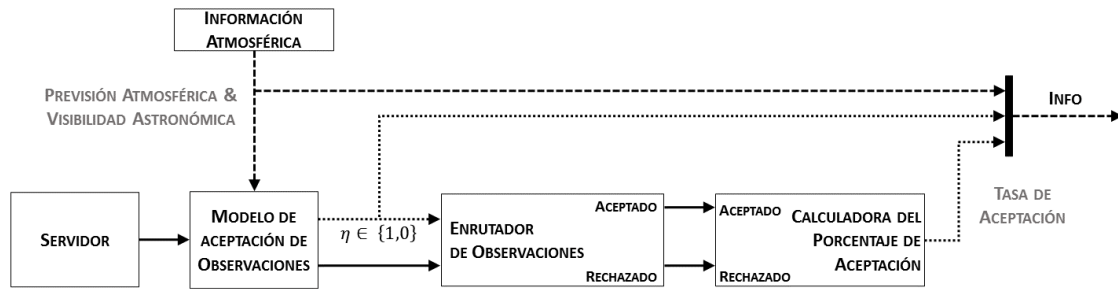


FIGURA 6.3: Modelo del telescopio.

entre la recepción de la solicitud de observación y su ejecución o rechazo por el telescopio. Esta información se ha obtenido directamente de los registros de la red, calculándose el tiempo promedio entre todas las solicitudes del telescopio.

■ Modelo de Aceptación de Observaciones

Este bloque implementa la aceptación o no de la observación que se acaba de recibir. Aunque existen diferentes razones que afectan la decisión, la más importante está relacionada con las condiciones meteorológicas en la ubicación del observatorio. Si el tiempo no está despejado, el sistema de control del telescopio mantendrá la cúpula cerrada y no se ejecutarán las peticiones ofrecidas. Por lo tanto, la aceptación de una solicitud en el modelo del telescopio dependerá principalmente del clima en su ubicación.

Para emular este comportamiento, se ha utilizado un modelo de regresión lineal generalizada. Este tipo de modelos establece una relación entre una variable de respuesta y uno o más predictores. La variable de respuesta se asume que es una distribución particular dentro de la familia de distribución exponencial (Fox, 2015). En el caso particular de la aceptación de la solicitud de los telescopios, la variable de respuesta es la propia decisión, $y \in \{0,1\}$; por lo tanto, se asume la distribución de Bernoulli. Por otro lado, como ya se ha explicado, sólo se utiliza el tiempo en la ubicación del observatorio para predecir el comportamiento del telescopio; por lo tanto, el modelo sólo utilizará esta variable como predictor. Este modelo está definido por:

$$\text{logit}(y) = \log\left(\frac{y}{1-y}\right) = a + b \cdot \alpha \quad (6.8)$$

donde y es la respuesta media del modelo a la predicción meteorológica dada, α , en la ubicación del observatorio; y a y b son los parámetros del modelo de regresión lineal generalizada que se han estimado. Para el caso específico de la distribución de Bernoulli, esa respuesta media coincide con la probabilidad de ocurrencia de un resultado de 1.

Teniendo esto en cuenta, una vez obtenido el modelo, éste dará la probabilidad de que una observación sea aceptada para un valor específico de previsión meteorológica. Para saber si finalmente el modelo del telescopio aceptará o no dicha observación se obtiene un valor numérico aleatorio, c , entre 0 y 1 (siguiendo una distribución uniformemente distribuida). Si éste es inferior o igual al valor de la probabilidad, y , el modelo del telescopio acepta la observación; en caso contrario la rechaza (6.9).

$$c = rnd()$$

$$\eta = \begin{cases} 1, & \text{si } c \leq y \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (6.9)$$

Siendo $rnd()$ una función que devuelve un número aleatorio entre 0 y 1 siguiendo una distribución uniforme; y es la probabilidad de ocurrencia de 1 del modelo del telescopio; y η es la ejecución o no de la observación ofrecida.

Para que el modelo encaje adecuadamente con la realidad, tanto la variable de entrada (el tiempo en el observatorio relacionado con una solicitud) como la de salida (aceptación o no de la misma), han sido proporcionados por datos reales de la red GLORIA.

■ Enrutador de Observaciones

Este bloque se encarga de separar las entidades en dos grupos: aquellas que han sido aceptadas y aquellas que no lo han sido. Para ello utiliza como señal de control la aceptación o no de las distintas observaciones.

6.5. Realimentación

Todas las entidades, es decir las peticiones de observación, que han sido aceptadas de todos los telescopios son combinadas en un único camino, de igual forma las entidades no aceptadas son también combinadas en un único camino. Con ambas se va calculando de manera autónoma el porcentaje de aceptación de la red. Finalmente, las entidades que han sido aceptadas son eliminadas de la red. Sin embargo, las no aceptadas entran en el bloque de 'Reasignación'. A continuación se detallan los bloques asociados a la realimentación del modelo: el bloque 'Reasignación' y el bloque 'Realimentación de la Red de Telescopios'.

■ Reasignación

Este bloque se encarga de gestionar el proceso de reasignación de observaciones. Para ello, el primer paso es recuperar, de la entidad, el valor del atributo asociado a este proceso.

Si dicho atributo es superior a 1, es decir, no se han completado las n reasignaciones máximas con las que se configuró la entidad, la entidad es reencaminada hacia la entrada del algoritmo de decisión. Previamente se sustrae una unidad al atributo de reasignaciones, para así contabilizar este procesado.

Si por el contrario, el valor del atributo de reasignaciones es 1, es decir, ya han sido completadas las n reasignaciones máximas a las que se puede someter una entidad y finalmente no ha sido aceptada, dicha entidad es descartada.

En la red GLORIA real, el proceso de reasignación dura x días, es decir, una solicitud de observación no ejecutada puede reasignarse durante un tiempo máximo de x días. Transcurrido este período, si la observación no se ha ejecutado, se informa al usuario de que no se han tomado imágenes. En el modelo de GLORIA, este proceso se ha simplificado y el número máximo de telescopios que intentan ejecutar la misma petición se ha fijado en x , es decir, el número de días que realmente dura en la red real. No es exactamente lo mismo que en la red real de GLORIA, pero en general, en la red GLORIA se realizan intentos de ejecución consecutivos en noches consecutivas.

■ Realimentación de la Red de Telescopios

Este bloque se encarga de organizar todos los datos que son necesarios realimentar en la red. Por un lado, la tasa de aceptación de observaciones por telescopio, necesaria para el algoritmo de lógica difusa. Por otro lado, los datos necesarios para que el algoritmo probabilístico pueda adaptar su salida a los cambios producidos en la red.

En cuanto a la tasa de aceptación del telescopio, se calcula directamente a partir del modelo del telescopio mientras se ejecuta la simulación. Teniendo en cuenta las observaciones aceptadas por telescopio del total ofrecido al mismo.

Por otro lado, los datos que tienen que realimentarse para el algoritmo probabilístico son los necesarios para poder estimar la probabilidad condicional de que una observación se ejecute en un determinado telescopio, dados unos valores de predicción y visibilidad concretos. Para realizar esta estimación se utiliza un modelo de regresión lineal generalizada que se va modificando a lo largo de toda la ejecución de la simulación (apartado 5.4). Para obtener este modelo se necesita el histórico de aceptación de cada telescopio asociado a los valores concretos de previsión y visibilidad.

Todos los datos necesarios son proporcionados por el modelo de cada uno de los telescopios, este bloque se encarga de recibir la información, organizarla y proporcionársela al bloque 'Algoritmo de Decisión'.

Capítulo 7

Implantación y Resultados

7.1. Introducción

El planificador descrito en capítulos anteriores, se implantó en la red de telescopios GLORIA. Aunque la red GLORIA estaba formada por 18 telescopios (Tabla 2.2), sólo 7 fueron configurados para ser utilizados por el planificador de la misma. Estos 7 telescopios son:

- **BOOTES-1** (Jelínek et al., 2016) de la red BOOTES en Huelva. BOOTES-1 es un observatorio robótico multifuncional cuyo instrumento principal es un telescopio Schmidt-Cassegrain de 30 cm, con una cámara CCD de lectura rápida instalada en una montura robótica Paramount ME. El objetivo principal es la observación de GRBs.
- **BART** (Nekola et al., 2010) situado en la República Checa, en el instituto astronómico AVČR en Ondřejov . BART es un telescopio de pequeña apertura diseñado para un rápido seguimiento de los GRBs. El objetivo científico principal del telescopio es obtener datos sobre los transitorios ópticos y resplandores de estallidos de rayos gamma, una emisión de luz simultánea o casi simultánea de estas emisiones de alta energía.
- **Pi of the Sky 1 y 2** (Mankiewicz et al., 2014) pertenecen al sistema Pi of the Sky y están ubicados respectivamente en Chile y Huelva. Pi of the Sky es un sistema de dos telescopios de campo amplio, que buscan fenómenos astrofísicos de escala temporal corta, en especial la emisión óptica temprana de GRBs.



- **CATA500** (Hamuy et al., 2012), perteneciente a la universidad de Chile y ubicado en el observatorio Cerro Tololo. Su principal objetivo es la búsqueda y seguimiento de supernovas, pero podría utilizarse para otros fines científicos. Tiene una CCD de alta eficiencia cuántica.
- **TORTORA** (Karpov et al., 2016) del Observatorio Astrofísico de Rusia. Tortora es un instrumento capaz de funcionar tanto en modo de seguimiento de campo amplio como en modo de seguimiento de campo estrecho y de recoger información polarimétrica y multicolor de todos los objetos dentro de su campo de visión con una resolución temporal de menos de un segundo.
- **REM** (REM, 2020) ubicado en el observatorio La Silla en Chile y perteneciente al Instituto Nacional de Astrofísica italiano. REM es un telescopio de reacción rápida de 60 cm de diámetro. El telescopio alberga dos instrumentos: una cámara de imágenes infrarrojas, y un generador de imágenes visible con 4 bandas de paso simultáneas.

Inicialmente el planificador se desplegó y se puso en funcionamiento con el algoritmo meteorológico. Posteriormente, se diseñó el algoritmo basado en lógica difusa y fue desplegado en la red, sustituyendo al algoritmo meteorológico inicial. Sin embargo, el proyecto GLORIA finalizó y desafortunadamente el algoritmo probabilístico no fue posible probarlo en la red real.

A continuación se describe la implementación del planificador, posteriormente los resultados obtenidos durante el tiempo de funcionamiento de la red GLORIA, incluyendo una comparativa entre los datos obtenidos con el algoritmo meteorológico y el de lógica difusa. A continuación, se detalla la validación del modelo de la red GLORIA que se ha desarrollado para finalmente hacer una comparativa del rendimiento de los tres algoritmos desarrollados.

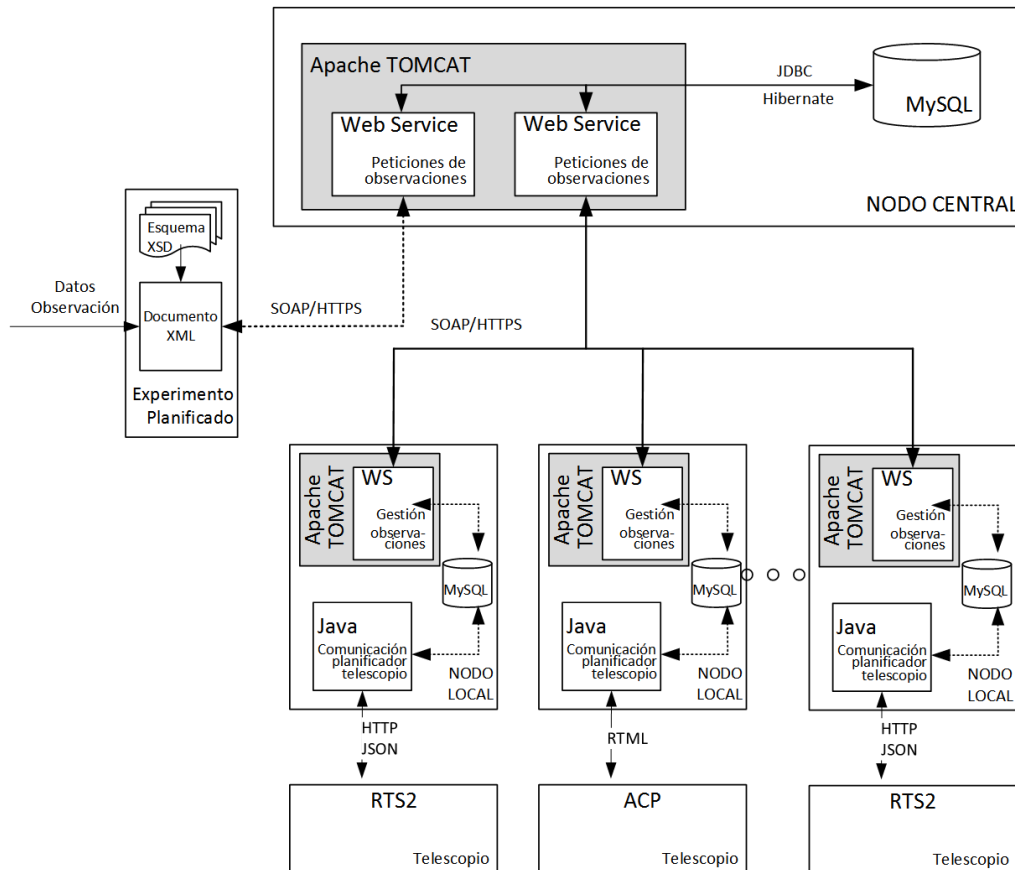


FIGURA 7.1: Diagrama de componentes de la arquitectura del planificador.

7.2. Implementación del planificador

El planificador descrito en los capítulos anteriores ha sido desarrollado empleando como base el lenguaje de programación JAVA. La figura 7.1 muestra el diagrama de componentes, a nivel de tecnologías empleadas, de la arquitectura del planificador. Las funciones de usuario proporcionadas por el planificador han sido implementadas a través de Servicios Web utilizando SOAP sobre HTTPS para la comunicación entre el experimento planificado de la red GLORIA (Apartado 2.4) y el nodo central. Los datos correspondientes a la observación solicitada por el usuario son enviados como un documento XML siguiendo un esquema de peticiones XSD. Adicionalmente, el nodo central implementa otro Servicio Web para comunicarse con los nodos locales, siguiendo el mismo esquema de comunicación que con el experimento planificado. Ambos Servicios Web han sido desplegados en servidores de aplicaciones web (Apache TOMCAT), y utilizan MySQL como base de datos para almacenar todos los datos persistentes asociados. El acceso a MySQL se realiza a través de JDBC e Hibernate (Ottinger, 2014).

En cuanto a los nodos locales, proporcionan otro Servicio Web desplegado para la gestión de las observaciones. A través de éste se comunican con el nodo central para intercambiar toda la información asociada a éstas. Internamente, el estudio de visibilidad se realiza utilizando Libnova, una librería libre para el cálculo asociado a astrometría y astrodinámica (Libnova, 2019). Por otro lado, para la comunicación con el planificador local del telescopio, se utiliza un proceso Java adaptado al tipo de comunicación específica requerida por el telescopio. Para el caso de un telescopio con RTS2 se intercambian documentos JSON sobre HTTP, y para un telescopio con ACP se utiliza RTML (Remote Telescope Markup Language). Tanto el Servicio Web como el proceso Java utilizan MySQL para el intercambio y persistencia de datos.

En cuanto al número de pasos del proceso de reasignación ha sido fijado en 3 días, estableciendo un compromiso entre tiempo máximo de espera por parte del usuario y maximización de la tasa de aceptación global.

7.3. Resultados en la red

Para comprobar el correcto funcionamiento del planificador en la red GLORIA se ha analizado un período de tiempo de 17 meses. Estos meses comprenden el comienzo de funcionamiento del planificador, de manera que inicialmente se empleó el algoritmo de decisión meteorológica, y posteriormente se cambió al algoritmo basado en lógica difusa. La elección de este período de tiempo permite comparar el rendimiento de un algoritmo y otro.

Durante este período de tiempo se enviaron 3.949 peticiones de observación, generadas por 863 usuarios distintos. No todas estas observaciones podían ser ejecutadas por alguno de los telescopios disponibles en la red, ya que las restricciones que se especificaron hicieron que algunos objetos no fueran visibles por ninguno de los telescopios. Teniendo en cuenta este hecho, 1.600 peticiones son las que realmente fueron ofrecidas a los telescopios, de las que 632 fueron finalmente completadas con éxito por los mismos, el 39,5% de las mismas.

De todas las observaciones solicitadas a la red, el 69,31% se corresponde con el período en el que el algoritmo de decisión meteorológico fue utilizado y el 30,69% con el algoritmo de decisión basado en lógica difusa. El porcentaje es sensiblemente mayor en

el primero de los algoritmos debido a que éste estuvo funcionando más tiempo que el segundo.

En la figura 7.2 aparece una comparativa de la tasa de aceptación de ambos algoritmos. Se puede observar como en el período en el que el algoritmo de lógica difusa fue utilizado el porcentaje es ligeramente superior: 43,58 %, frente al 37,69 % en el caso de utilización del algoritmo de predicción meteorológica.

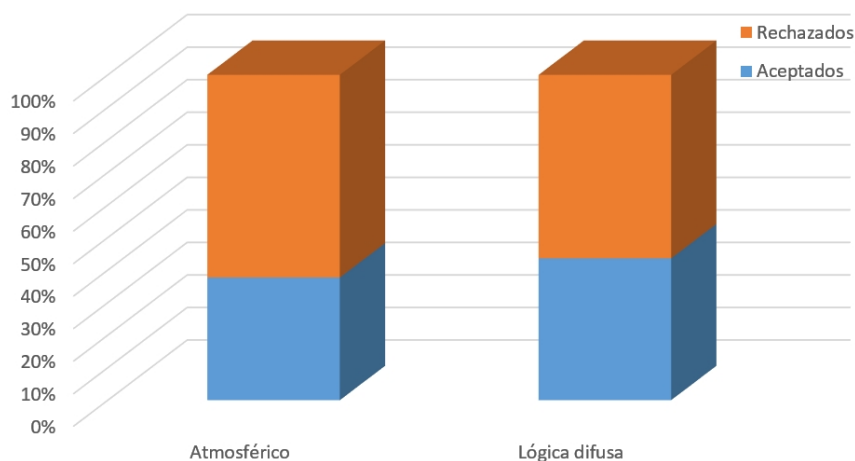


FIGURA 7.2: Tasa de aceptación por algoritmo durante el período de evaluación.

Aunque las tasas de aceptación obtenidas son muy similares, la ventaja del empleo del algoritmo basado en lógica difusa aparece al analizar el proceso de reasignación. Tal y como muestra la figura 7.3, el número de observaciones completadas en un sólo paso de reasignación es sustancialmente superior en el algoritmo de lógica difusa. El porcentaje de observaciones completadas en el primer paso de reasignación pasa del 56,49 % en el algoritmo de decisión meteorológico, al 76,64 % en el algoritmo basado en lógica difusa.

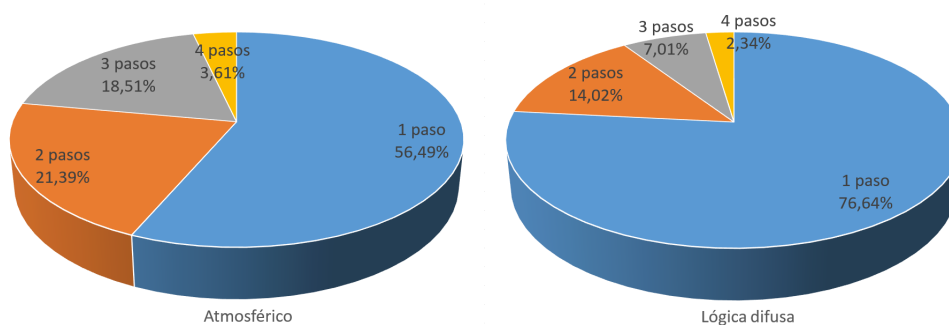


FIGURA 7.3: Agrupación de las observaciones completadas en función del número de pasos del proceso de reasignación para cada uno de los algoritmos evaluados.

Este hecho implica que el tiempo medio de ejecución de una observación es inferior en el segundo caso. Utilizando el primer algoritmo, las observaciones completadas tardaron de media 41 horas, sin embargo, al utilizar el algoritmo basado en lógica difusa, este tiempo decreció hasta 27,29 horas.

Para poder hacer una mejor comparación de ambos algoritmos se ha realizado un análisis más detallado, a través de una gráfica que muestra el frente de Pareto de ambos algoritmos, representado en la figura 7.4. En esta figura se muestra el porcentaje de aceptación, función objetivo (5.1), frente al número máximo de pasos S , función de coste (5.2), para diferentes conjuntos de observaciones de tamaño $N = 30$. En esta figura se puede observar como el frente de Pareto, representado con una línea negra en la misma, indica que para un mismo número máximo de pasos, la tasa de aceptación es mucho mejor en el algoritmo de de lógica difusa, llegando a alcanzar el 100 % para el caso de un número de pasos $S = 5$. Además, esta figura indica para cada algoritmo, cuál sería el porcentaje de aceptación de planes en función del número de saltos máximo que se definan. De esta manera se puede apreciar que con $S = 3$ se podría alcanzar un 85 % de porcentaje de aceptación y para $S = 5$ se alcanzaría un 100 % en el caso de emplear el algoritmo de lógica difusa.

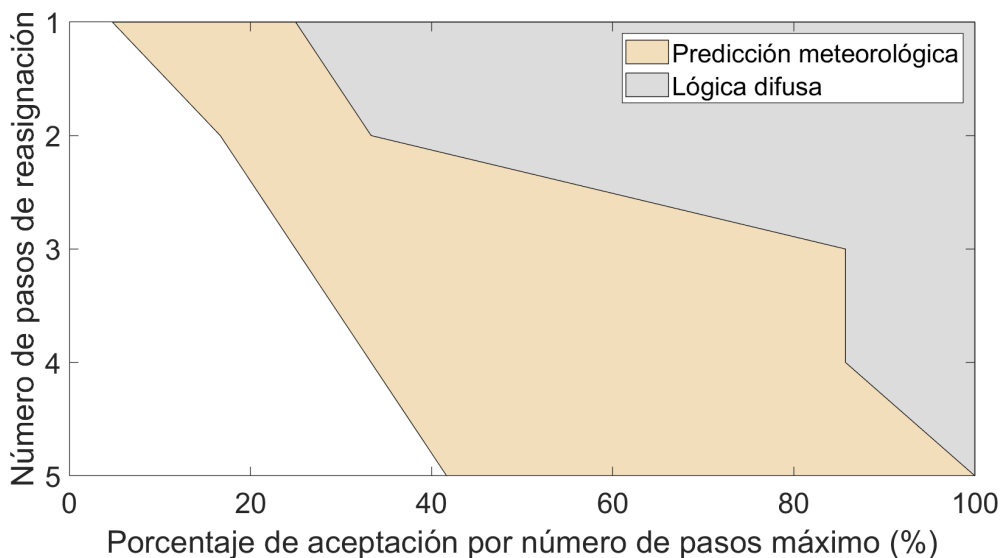


FIGURA 7.4: Frente de Pareto para porcentaje de aceptación por número de pasos máximo frente al número de pasos de reasignación.

Por otro lado, como se ha indicado en capítulos anteriores, los usuarios tuvieron la posibilidad de puntuar los telescopios a través de la calidad de la imagen que éstos tomaban. Esta puntuación comprende valores entre el 0 y el 10. La figura 7.5 muestra la

puntuación de los telescopios tras finalizar el período de análisis. Puede verse cómo todos los telescopios superan el 5, destacando el telescopio Pi of the Sky 1 que alcanza la máxima puntuación con un 10.

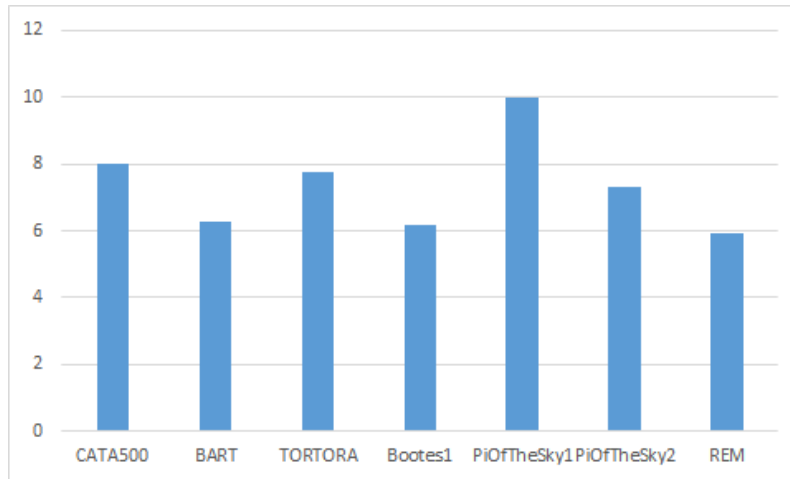


FIGURA 7.5: Puntuación de los telescopios durante el período de evaluación.

7.4. Implementación del modelo

Aunque 7 telescopios fueron configurados para ser utilizados en el experimento planificado y por tanto por el planificador, en las simulaciones sólo se han considerado 4. Debido a los problemas iniciales y al tiempo disponible ofrecido por los propietarios a la red GLORIA, sólo 4 de los 7 telescopios tenían datos suficientes para configurar adecuadamente su modelo. En concreto, se han utilizado los siguientes telescopios: CATA500, Tortora, Pi of the Sky 2 y Bart.

Todo el modelado detallado en el capítulo 6 ha sido desarrollado utilizando Matlab-SimEvents, el motor de simulación de eventos discretos de Matlab. Éste permite analizar modelos de sistemas basados en eventos y optimizar sus características de rendimiento. Para ello dispone de bloques predefinidos, como servidores, enrutadores, etc., que permiten modelar el enrutamiento, los retrasos de procesamiento y la priorización en los modelos. También permite estudiar los efectos de la sincronización de tareas y el uso de recursos limitados dentro del modelo. A continuación se indican los bloques de Matlab Sim-Events que han sido utilizados en el modelo que se detalló en el capítulo 6.

- **Generador temporal de Entidades.** Utilizado en el Bloque Usuario para generar las peticiones de observación y establecer la tasa de generación de las mismas. Para ello, se configura el módulo para generar entidades siguiendo una distribución constante e igual al valor medio de la tasa de generación de peticiones de la red GLORIA.
- **Módulo de asignación de atributos.** Este módulo es utilizado en el Bloque Petición de Observación para asignar los distintos parámetros a la entidad que se ha generado.
- **Combinador de caminos.** Este módulo ha sido utilizado en el Módulo Combinador de Peticiones de Observación. Ha sido configurado con 2 puertos de entrada, uno asociado a las entidades que son generadas y otro para las entidades que provienen del proceso de reasignación.
- **Servidor.** El módulo servidor ha sido utilizado tanto en el modelo del planificador como en el modelo de cada uno de los telescopios. En estos últimos se ha utilizado el parámetro de tiempo de servicio para establecer el tiempo medio de ejecución de una observación en un telescopio. El valor establecido será el tiempo que la entidad permanezca en el servidor antes de continuar el camino.
- **Interruptor de salida.** utilizado en el Bloque Enrutador de Telescopios y Enrutador de Observaciones. En el primero se configura para tener 4 salidas, una por telescopio disponible; y para que la señal de control, que decide por qué salida encaminar la entidad, sea el identificador del telescopio que se ha seleccionado por el algoritmo de decisión. En el segundo se configura con dos puertos de salida, uno para las entidades aceptadas y otro para las entidades rechazadas por el telescopio, siendo la señal de control la aceptación o no de la observación.
- **Función Matlab.** Se define una función de Matlab para la implementación de los tres algoritmos de decisión que se han definido. Asimismo, también es utilizada una función para el modelo de aceptación de cada uno de los telescopios.

7.5. Resultados en simulación

Este apartado muestra los resultados obtenidos en simulación y se centra en dos objetivos principalmente. El primero es la validación del modelo de red que se explicó en el capítulo 6. El segundo es la comparación de los tres algoritmos de decisión de telescopios implementados, haciendo uso del modelo de la red GLORIA diseñado.

7.5.1. Validación del modelo

Como paso previo a la utilización del modelo se ha procedido a su validación. Es decir, hay que comprobar que, bajo ciertas circunstancias controladas, el modelo de la red y la red real proporcionan resultados equivalentes.

De todo el modelo de la red, la parte clave es el telescopio en sí mismo. La precisión en la tasa de aceptación de cada uno de los telescopios repercutirá directamente en un mejor modelo de la red en su totalidad. Por lo tanto, el primer paso del proceso de validación es comprobar el comportamiento del telescopio. Para realizar correctamente esta validación, sólo se ha habilitado el modelo del telescopio en la simulación. El resto de parámetros han sido modificados para utilizar directamente la información adquirida de la red GLORIA real y no del modelo diseñado. Así, la salida de la simulación, en este caso la tasa de aceptación del telescopio, puede compararse directamente con la de la red en el período de tiempo en el que se recuperaron los datos.

El período de tiempo utilizado para este paso de validación fue el tiempo en que en la red GLORIA se utilizó el algoritmo de lógica difusa. De los datos recogidos de este período, se adquieren los parámetros del modelo y la tasa de aceptación de cada telescopio. Los primeros se utilizan directamente en el modelo y los segundos se comparan con los datos de salida de las simulaciones para comprobar si el modelo del telescopio se ajusta realmente a los reales. Para superar la posible baja cantidad de datos para ejecutar correctamente la simulación, se ha utilizado un muestreo aleatorio simple con la técnica de reemplazo (Arnab, 2017). Esta técnica consiste en utilizar los datos de forma aleatoria, sin eliminarlos del espacio muestral.

La figura 7.6 muestra la tasa de aceptación de los telescopios durante ese periodo de tiempo junto con la misma información pero obtenida mediante la simulación del modelo. Como se puede ver, los resultados de la simulación son muy similares a los de la

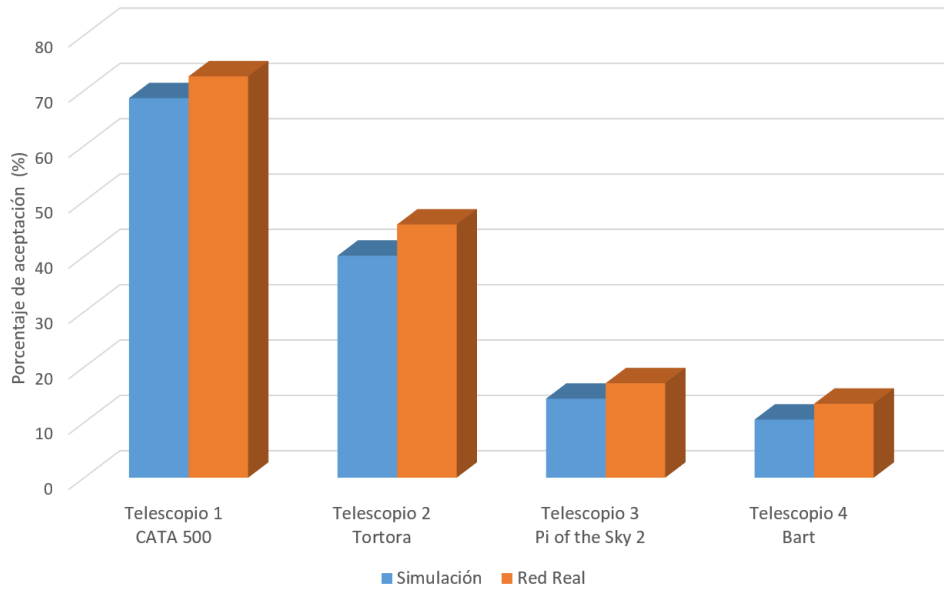


FIGURA 7.6: Comparativa entre el porcentaje de aceptación de la red GLORIA y el obtenido en la simulación para cada telescopio por separado.

red real de GLORIA. La diferencia máxima ocurre para el segundo telescopio, siendo inferior a 6 puntos. La diferencia se debe a la simplificación del modelo, donde sólo se ha utilizado la información meteorológica para decidir si el telescopio acepta o rechaza una observación. En concreto, en el caso del telescopio 2, Tortora, estuvo un período inoperativo por problemas en el propio telescopio que no se han tenido en cuenta en el modelo. Aunque esta decisión se ve realmente afectada por más problemas, esta simplificación produce, como se puede ver, resultados precisos.

Una vez validado el modelo de telescopio individual, se habilita toda la red y el modelo de parámetros para comprobar si la tendencia de la tasa de aceptación global simulada de la red coincide con la real. Para ello se utilizan todos los modelos que se detallaron en el capítulo 6.5 durante la simulación. Además, la tasa de peticiones de observación se fijó al valor medio del de la red real. La figura 7.7 muestra en azul la evolución de la tasa de aceptación de la red a lo largo de todo el tiempo de simulación. Se puede observar un período transitorio inicial y cómo se estabiliza la tasa de aceptación. Junto con los datos de simulación, en rojo, se muestra la tasa de aceptación total de la red real durante el período de tiempo en que se utilizó el algoritmo difuso. El gráfico muestra una pequeña diferencia en porcentaje, inferior a 3 puntos, entre ambos.

La diferencia está en dos aspectos que no son completamente iguales en la simulación y en la red real. La primera es que el modelo difuso desplegado en la red real de GLORIA

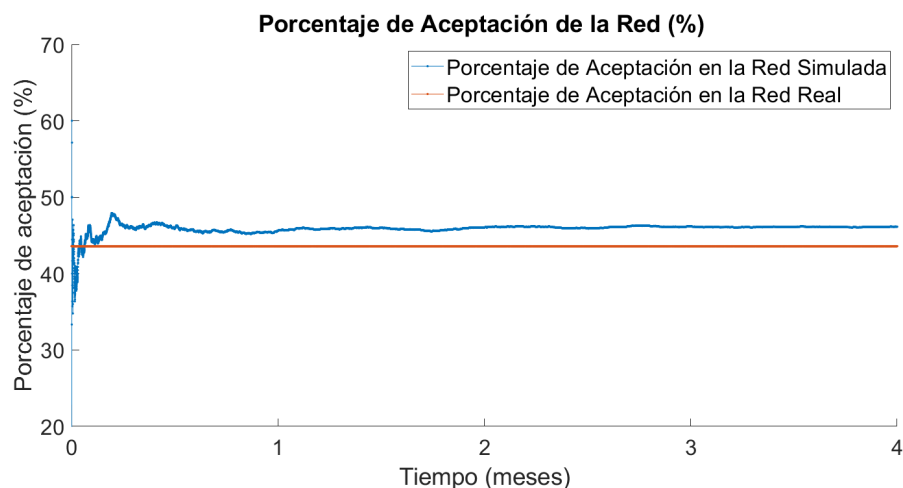


FIGURA 7.7: Comparativa entre el porcentaje de aceptación total de la red GLORIA con el obtenido con la simulación del modelo de red implementado. Ambos, tanto los datos reales como los simulados, han sido adquiridos utilizando el modelo de decisión de telescopio de lógica difusa.

había sido modificado un par de veces para ajustar su rendimiento; mientras que durante la simulación, sólo se utilizó el último. El segundo es el proceso de reasignación, como se explicó en el apartado 6.5 hay una pequeña diferencia entre el proceso real y el simulado. De hecho, el proceso simulado puede ser más ventajoso, lo que implica que la tasa de aceptación sea mejor en este caso.

7.5.2. Comparativa de algoritmos

Este apartado describe el conjunto de simulaciones que se han llevado a cabo para analizar el rendimiento de los tres algoritmos de decisión implementados en la red GLORIA y cómo el algoritmo de decisión evoluciona mejorando el rendimiento de la red. Es decir, los tres algoritmos de decisión propuestos implican una evolución de uno sobre otro con el fin de mejorar el rendimiento de la red, tal y como se verá en este apartado. Estas simulaciones incluyen la comparativa de los distintos algoritmos bajo condiciones fijas de la red y bajo condiciones variables. Considerando como condición variable la anulación de alguno de los telescopios utilizados durante la ejecución de la simulación. Finalmente, se estudian los resultados desde el punto de vista del proceso de reasignación, analizando el número de telescopios por el que pasa una petición de observación hasta ser finalmente ejecutada o descartada.

Para realizar las comparaciones de los distintos algoritmos bajo las mismas condiciones, cada algoritmo ha de ser probado con exactamente las mismas peticiones de observación y las mismas condiciones meteorológicas del observatorio por petición. El uso de las mismas peticiones de observación implica que la lista de telescopios disponibles por petición es la misma para los tres algoritmos, así como la tasa de peticiones.

Por otro lado, el modelo de regresión lineal generalizada que forma parte del algoritmo probabilístico tiene que ser inicializado para hacer las simulaciones. Para ello se han utilizado dos tipos de datos diferentes. Por un lado, se han realizado simulaciones utilizando datos aleatorios para el ajuste inicial del modelo; y por otro lado, se han hecho simulaciones ajustando inicialmente el modelo con los datos producidos por la simulación del algoritmo de lógica difusa.

Condiciones fijas

La figura 7.8 muestra el porcentaje de aceptación obtenido para los distintos algoritmos cuando todos los telescopios se mantienen activos durante la simulación.

La línea verde muestra la tasa de aceptación total de la red cuando se utilizan datos de lógica difusa para ajustar inicialmente el algoritmo probabilístico; y la línea amarilla muestra el comportamiento cuando se inicializa aleatoriamente. Se puede apreciar cómo este último tiende al primero cuando la realimentación está activa, adaptándose la tasa de aceptación total de la red a la obtenida cuando el algoritmo se inicializa con datos de lógica difusa. La razón de este comportamiento es que el rendimiento del telescopio en estas simulaciones no ha sido modificado, por lo que el modelo obtenido con los datos producidos por el algoritmo de lógica difusa está adaptado a la red. Si se ejecuta una simulación con el modelo inicializado aleatoriamente pero con la realimentación de red desactivada (línea púrpura en la fig. 7.8), la tasa de aceptación de la red permanece igual que al principio de la simulación, ya que no se está adaptando a las características de la red.

La figura 7.8 también muestra el rendimiento, en las mismas condiciones, del algoritmo de lógica difusa y del algoritmo meteorológico. Se puede ver que estos dos algoritmos producen una tasa de aceptación más baja que la obtenida con el algoritmo probabilístico, incluso cuando éste se inicializa aleatoriamente y la realimentación de la red está desactivada.

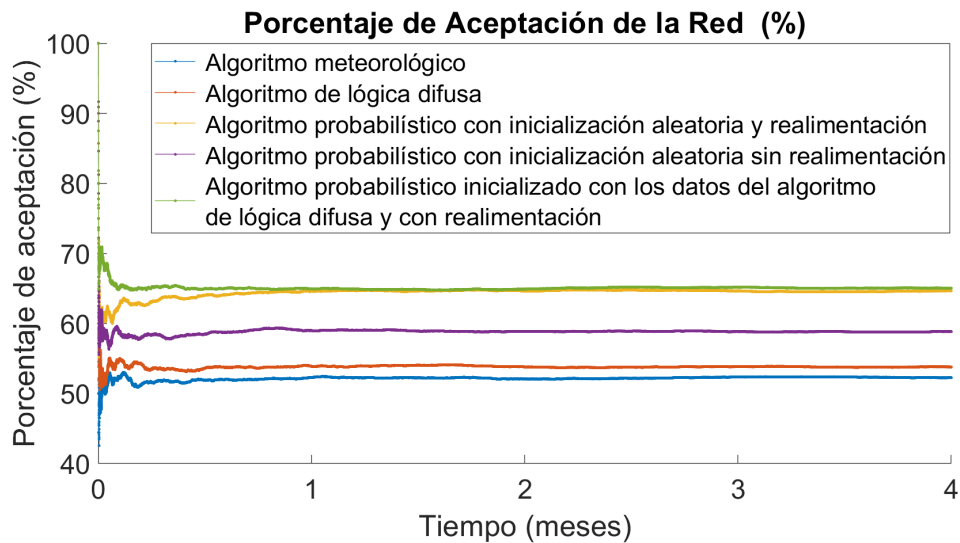


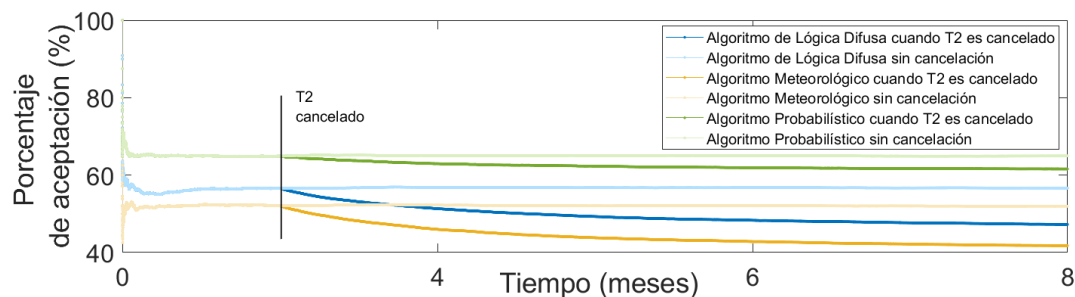
FIGURA 7.8: Comparativa entre los diferentes algoritmos de decisión de telescopio bajo las mismas condiciones de simulación.

Condiciones variables

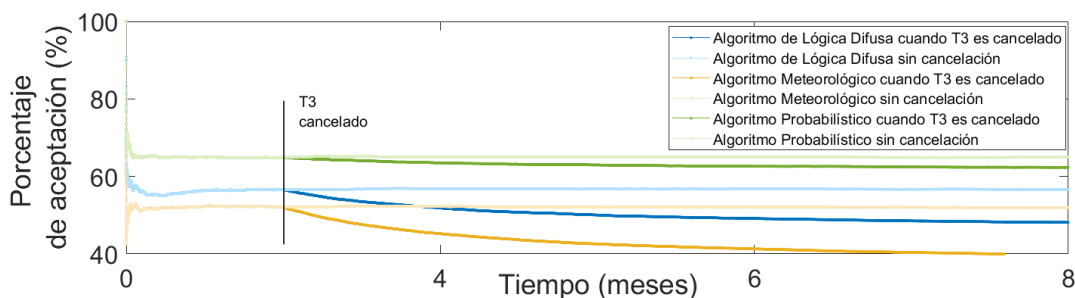
Una vez que los diferentes algoritmos han sido comparados en una configuración de red fija, se analiza su comportamiento frente a cambios producidos en la red. Específicamente se estudia la tendencia de la tasa de aceptación total de la red bajo estas circunstancias. Uno de los peores escenarios posibles es la cancelación de uno de los telescopios que estaban en uso. La figura 7.9 muestra el comportamiento de la tasa de aceptación total de la red cuando se cancela uno de los telescopios. Esta tendencia de la tasa de aceptación se compara con la tendencia cuando no se producen cambios en la red.

La figura 7.9a muestra el comportamiento de la red cuando el telescopio 2 es cancelado, mientras que la figura 7.9b muestra el comportamiento cuando es el telescopio 3 el que ha sido cancelado. En ambas figuras se representa el rendimiento de los tres algoritmos, utilizando para el algoritmo probabilístico la configuración de inicialización con los datos proporcionados por el algoritmo de lógica difusa.

Se puede observar que en el momento en que se cancela el telescopio, la tasa de aceptación de los tres algoritmos comienza a disminuir (líneas de color oscuro en las figuras) si se compara con la tasa de aceptación cuando la red está fija (líneas de color claro en la figura). Esta disminución se debe a que hay peticiones de observación que se están ofreciendo al telescopio recientemente cancelado. El motivo puede ser doble, porque es el único telescopio que puede ejecutar la observación debido a las limitaciones de la observación o porque el algoritmo de decisión le está ofreciendo la petición en lugar de



(a) El telescopio 2 es cancelado



(b) El telescopio 3 es cancelado

FIGURA 7.9: Resultados de la simulación cuando uno de los telescopios de la red es cancelado. Comparativa entre el porcentaje de aceptación total de la red cuando el telescopio se cancela y cuando se mantiene activo

ofrecerla a otro disponible. Aunque los tres algoritmos tienen la tendencia a disminuir la tasa de aceptación total de la red, la pendiente de disminución del algoritmo probabilístico es menor que la de los demás. La razón radica en el modelo de regresión lineal generalizada utilizado en el algoritmo probabilístico para predecir la probabilidad condicional de que una observación sea aceptada. Este modelo, como se vio en el apartado 5.4, se va adaptando a los cambios que se producen en la red.

La figura 7.10 muestra cómo el modelo de regresión lineal se va adaptando. En ella se puede observar cómo la probabilidad condicional de que una observación sea aceptada ($P(\eta|\alpha, \beta)$) por el telescopio 2, dado un par específico de valores para las variables de la predicción (α) y la visibilidad astronómica (β), cambia a lo largo del tiempo. Cada superficie de la figura pertenece a un modelo diferente durante el tiempo de adaptación del algoritmo probabilístico. La capa superior muestra la predicción de la probabilidad condicional cuando el telescopio sigue funcionando. Esta probabilidad aumenta a medida que disminuye el valor de la predicción meteorológica, es decir, a medida que el tiempo se hace más claro y sin precipitaciones. Y en cuanto a la variable de visibilidad astronómica, se puede ver como hay una mejora suave de la probabilidad cuando la visibilidad

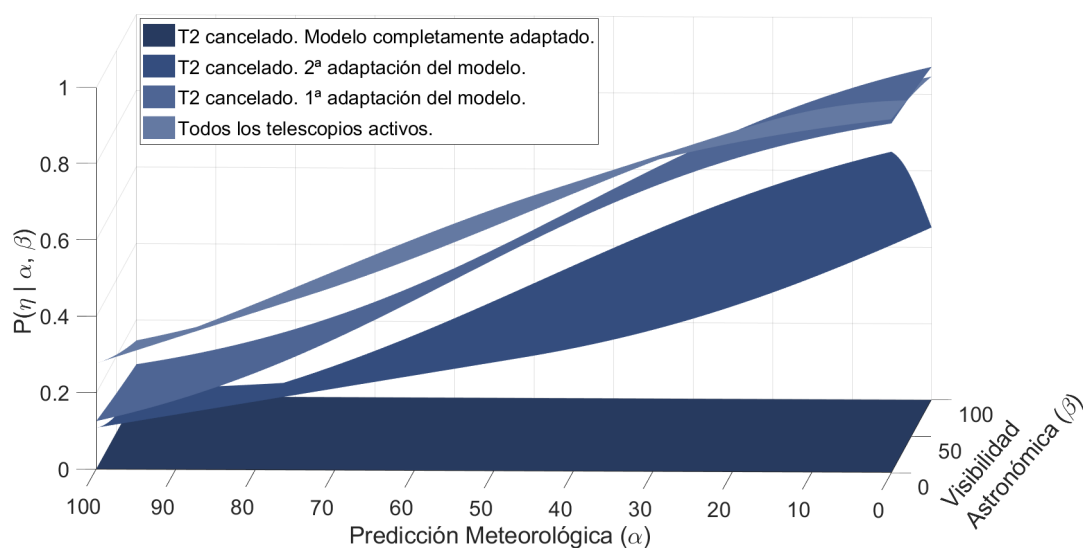


FIGURA 7.10: Adaptación del modelo de regresión utilizado en el algoritmo de decisión probabilístico cuando el telescopio 2 es cancelado.

aumenta. El resto de las superficies muestran cómo cambia el modelo de regresión cuando se cancela el telescopio 2. La probabilidad comienza a disminuir progresivamente hasta llegar a cero (superficie azul oscuro) cuando el modelo está totalmente adaptado.

Este comportamiento también se puede ver en la figura 7.11. Esta figura muestra la cancelación del telescopio 2 en tiempo de simulación entorno a $t=69.5$ días. A partir de ese momento, la probabilidad condicional comienza a disminuir teniendo en cuenta el comportamiento del modelo de regresión que se acaba de explicar. Se puede observar como hay tres pasos de disminución, cada uno relacionado con los tres pasos de adaptación del modelo. Durante este proceso la probabilidad condicional cambia de 0,35 en promedio a 0, tomando valores de 0,18 y 0,05 en promedio para los dos pasos intermedios. El valor inicial de la probabilidad toma estos valores y no mayores debido al modelo de las variables meteorológicas en su ubicación. La figura 6.2 muestra cómo la variable de predicción meteorológica para el telescopio 2 tiene su valor medio alrededor de 75, lo que produce valores de probabilidad cercanos a 0.4 cuando todos los telescopios están disponibles como muestra la figura 7.10.

Análisis del proceso de reasignación

Una vez analizados los tres algoritmos desde el punto de vista de la tasa de aceptación total de la red, se estudia el tiempo transcurrido entre la petición de observación y sus

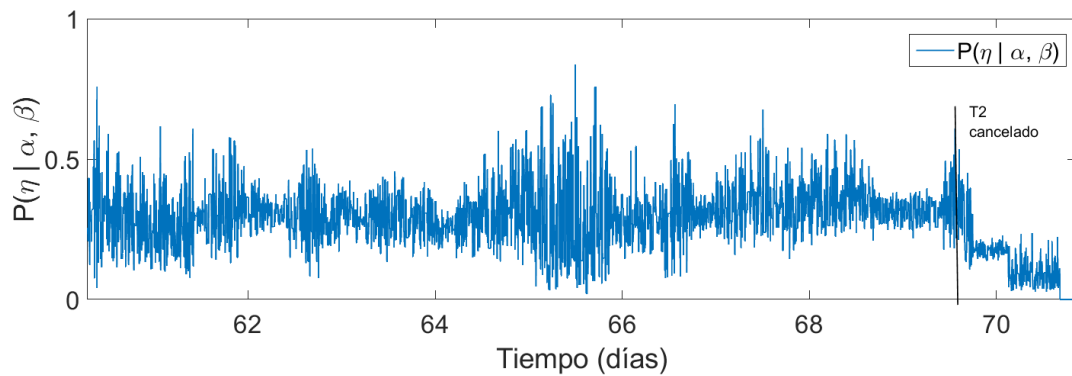


FIGURA 7.11: Probabilidad condicional de que una observación sea aceptada por el telescopio 2 cuando éste es cancelado.

resultados. Este tiempo está directamente relacionado con el número de pasos del proceso de reasignación, es decir, el número de telescopios a los que se ofrece la solicitud de observación hasta que es finalmente ejecutado o cancelado por el planificador.

La figura 7.12 muestra la tasa de ocurrencia de las observaciones completadas en uno, dos y tres pasos producidos por la simulación en dos casos. Por un lado, en condiciones de red fijas, es decir, cuando todos los telescopios están disponibles; y por otro lado, cuando el telescopio 2 fue cancelado. En el primer caso, las observaciones completadas en un solo paso son mayores para el algoritmo probabilístico. Este algoritmo alcanza el 73.56 % de peticiones de observación ejecutadas por el primer telescopio ofrecido, mientras que los algoritmos meteorológicos y de lógica difusa permanecen en un 56.84 % y 55.53 %, respectivamente. Este hecho implica que el tiempo total de proceso de una solicitud de observación se minimiza cuando se utiliza el algoritmo probabilístico. Además, si se analiza esta información cuando se cancela el telescopio 2 de la red, como se hace en el análisis de la tasa de aceptación, los resultados son ligeramente mejores. Puede verse como el porcentaje de observación completada en el primer paso por el algoritmo probabilístico es 3 puntos más alto que el obtenido en condiciones estáticas.

Finalmente, para comparar mejor los algoritmos se ha realizado un análisis más detallado. Como se indicó en la sección 5.1, el problema de la decisión del telescopio puede ser considerado como un problema de optimización multiobjetivo definido por una función objetivo y una función de coste. De esta manera, se analizan los tres algoritmos desde el punto de vista de estas dos funciones. Específicamente, la figura 7.13 muestra la tasa de aceptación de red definida por la ecuación (5.1), frente al número máximo de pasos de reasignación definidos por la ecuación (5.2), para diferentes conjuntos de observación de

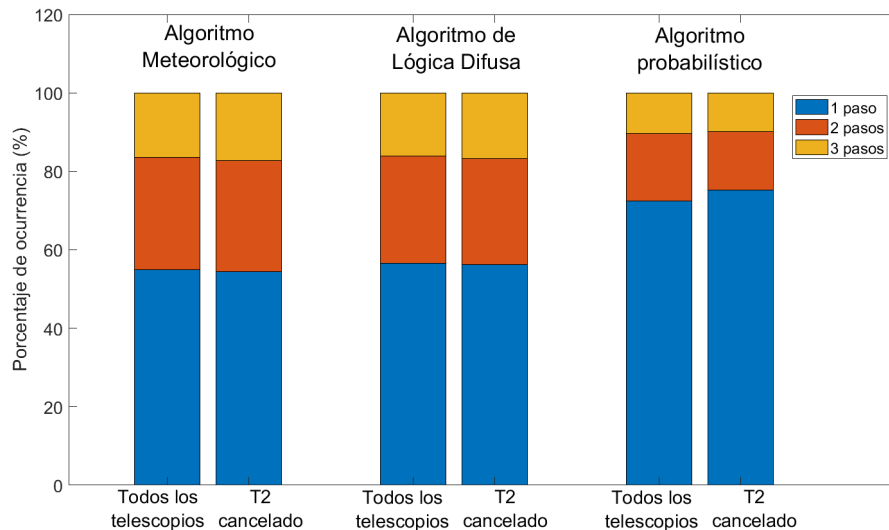


FIGURA 7.12: Comparativa del número de pasos de reasignación entre los diferentes algoritmos de decisión con el telescopio 2 es cancelado

tamaño $N = 100$. Para analizar mejor el rendimiento de los diferentes algoritmos frente al número máximo de pasos, las simulaciones se han configurado para que tengan como máximo 5 pasos de reasignación.

La figura 7.13 muestra cómo varía la tasa de aceptación de la red en función del número máximo de pasos de reasignación. Puede verse como para el mismo número máximo de pasos de reasignación, el algoritmo probabilístico puede alcanzar una mayor tasa de aceptación de la red. Por otro lado, los algoritmos de lógica difusa y meteorológico muestran un rendimiento similar sólo cuando se permite un paso de reasignación. En el resto de los casos, el algoritmo de lógica difusa alcanza valores superiores a los del meteorológico, pero siempre inferiores a los del algoritmo probabilístico. Este hecho se muestra claramente por medio de las líneas sólidas que aparecen en la figura. Estas líneas representan la frontera de Pareto para cada uno de los algoritmos. La línea relacionada con el algoritmo probabilístico es la que se encuentra más derecha de la figura, lo que indica que la tasa de aceptación de red mínima posible será superior a la del resto de los casos.

7.6. Discusión

Como se ha visto en los resultados de simulación (apartado 7.5), el algoritmo probabilístico obtiene unos resultados mejores que los otros dos algoritmos propuestos. En concreto, se mejoran los dos objetivos del planificador. Por un lado, el número total de

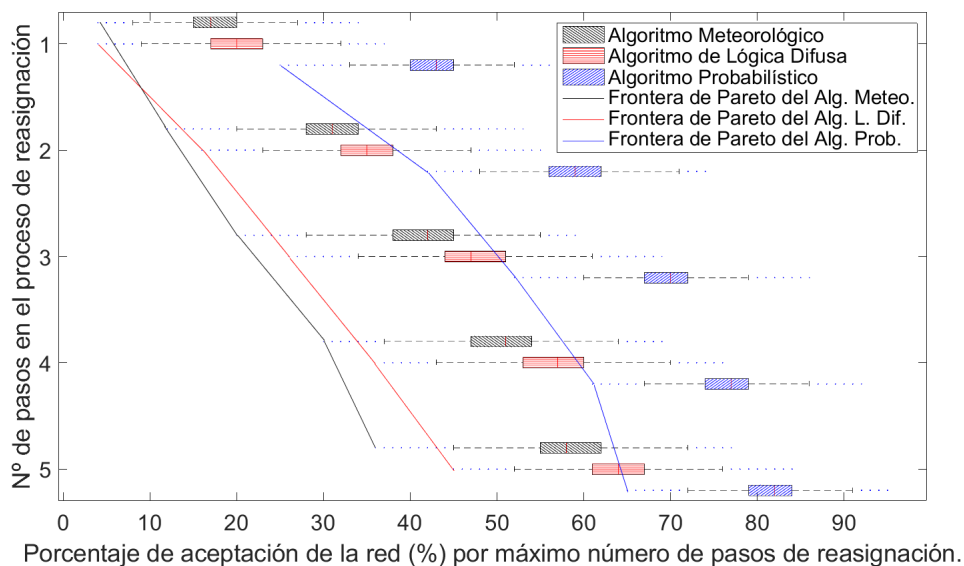


FIGURA 7.13: Frontera de Pareto para el porcentaje de aceptación de la red frente al número máximo de pasos de reasignación.

observaciones completadas con éxito se ve incrementado en unos 10 puntos con respecto al algoritmo de lógica difusa y en unos 12 con respecto al algoritmo meteorológico, cuando se utiliza el algoritmo probabilístico con realimentación (Fig. 7.8). Así mismo, esta mejora también es reflejada cuando uno de los telescopios es cancelado en la red. En este caso, al eliminar un telescopio la tasa de aceptación sólo se decrementa en unos 3 puntos, mientras que en el caso del algoritmo de lógica difusa se decrementa en unos 8 puntos y con el algoritmo meteorológico unos 10 (Fig. 7.9).

Por otro lado, este algoritmo reduce el tiempo transcurrido entre la petición de observación y los resultados de la misma, constatado al obtener un mayor número de observaciones completadas por el primer telescopio al que se le ofreció la observación. Siendo la diferencia con respecto a los otros dos algoritmos de unos 15 puntos (Fig. 7.12).

El proceso de reasignación en la red GLORIA fue configurado con un paso máximo de tres. A través de las simulaciones realizadas se ha constatado que dicho valor supone un compromiso válido entre la maximización de las observaciones completadas con éxito y la minimización del tiempo transcurrido para obtener los resultados. La figura 7.13 muestra que el incremento de los límites de la tasa de aceptación de la red aumenta en 10 puntos a medida que lo hacen los pasos de reasignación, hasta llegar a un número máximo de 3 pasos. A partir de este número, el aumento se ralentiza, siendo inferior a 10 puntos. Para el caso de 5 pasos se obtiene el mínimo incremento, siendo menos de 5 puntos con respecto a lo obtenido en 4 pasos.

Capítulo 8

Conclusiones y líneas futuras

8.1. Conclusiones

Durante las últimas décadas se han ido desplegando una gran variedad de redes de telescopios con distintos objetivos científicos: observación de GRBs, seguimiento de basura espacial, monitorización de objetos que varían en el tiempo, etc. Algunas de ellas incluyen programas educativos o para la ciudadanía en general con el objetivo principal de acercar la astronomía a la sociedad.

Todas estas redes disponen de un planificador que se encarga de gestionar las observaciones a realizar en la red, optimizando distintos objetivos. Los objetivos más comunes son el tiempo de uso de los distintos telescopios de la red, el retorno científico de los resultados o la prioridad de las observaciones. Normalmente, el número de objetivos a optimizar es superior a uno, lo que implica la resolución de un problema de optimización multiobjetivo que, dependiendo de la red, es resuelto con distintas técnicas: redes neuronales, técnicas heurísticas, etc. El uso de estas técnicas supone tener el control por parte del planificador de la red del tiempo de ejecución de las observaciones, es decir, tener el control total de los telescopios que componen la red.

Esta tesis ha propuesto el diseño de un planificador de observaciones para una red de telescopios en la que, a diferencia de otras redes, no se tiene el control total sobre los telescopios. Este planificador ha sido implementado y desplegado para la red GLORIA que integró bajo una misma red a 18 telescopios extendidos a lo largo de cuatro continentes. Estos telescopios ya estaban en uso antes del despliegue de la red por lo que su tiempo de observación fue compartido por la red y por sus propietarios. Este hecho impide que se tenga el control total sobre los telescopios y sobre el tiempo de ejecución de

las observaciones y por tanto no se puedan utilizar técnicas de optimización clásicas para la gestión del planificador.

El planificador propuesto se basa en una arquitectura en capas. La capa más baja la componen los telescopios, en concreto el planificador propio del que dispongan. Se encargan de la ejecución de la observación según sus propias políticas que no pueden ser modificadas por el planificador de la red. La capa intermedia la forman los nodos locales que van asociados uno a uno con cada telescopio. Estos nodos establecen comunicación con los planificadores de los telescopios para transferirles la observación a ejecutar. Por último, la capa superior está formada por un único nodo, el nodo central cuyo principal objetivo es decidir qué telescopio, de los disponibles, ejecutará la observación.

El objetivo principal del planificador es maximizar el porcentaje de observaciones ejecutadas y minimizar el tiempo transcurrido entre la realización de la petición de observación y la recepción del resultado de la misma. Con el fin de resolver este problema de optimización multiobjetivo, ya que no se tiene el control sobre los planificadores locales de los telescopios, se han planteado tres algoritmos distintos de decisión del telescopio. Todos ellos se basan en puntuar los distintos telescopios disponibles y elegir el que más puntuación haya obtenido.

El primer algoritmo planteado se basa únicamente en la predicción meteorológica en la ubicación del observatorio. Para ello se obtiene la predicción a través de proyectos libres que ofrecen dicha información, y se calcula una puntuación siguiendo una métrica que tiene en cuenta aspectos tales como precipitación, nubosidad y *seeing*.

Posteriormente se definió un algoritmo basado en lógica difusa que, junto con la información meteorológica, tiene en cuenta aspectos tales como la calidad del objeto a observar e información previa sobre el comportamiento de los telescopios.

Finalmente se diseñó un algoritmo probabilístico que se basa en la predicción de la probabilidad condicional de aceptación de una observación por un telescopio en concreto. Para obtener esta probabilidad tiene en cuenta la evolución anterior de la red, realimentado el histórico de datos para ir adaptándose a la misma.

Para poder realizar una comparación exhaustiva de los tres algoritmos se ha realizado un modelo de la red GLORIA basado en un sistema de eventos discretos, en los que la petición de observación es considerada el evento. Este modelo de red ha sido validado positivamente con los datos reales producidos por la red GLORIA y posteriormente ha

sido utilizado para comparar los tres algoritmos. Se han llevado a cabo distintas simulaciones que han demostrado como el algoritmo probabilístico tiene mejor rendimiento que el resto, tanto desde el punto de vista de la tasa de aceptación de la red, como del tiempo transcurrido entre la petición de observación y la recepción de sus resultados.

8.2. Hipótesis y contribuciones

Una vez expuesta, de manera resumida en el apartado anterior, todo el trabajo realizado en esta tesis, se van a analizar una a una las hipótesis de partida y las contribuciones del presente trabajo que se expusieron en el apartado 1.2.

- **Hipótesis 1. El problema de optimización multiobjetivo se puede solucionar eligiendo adecuadamente a qué telescopio se le ofrece la observación.**

En el apartado 5.1 se demuestra que asignando a cada telescopio una puntuación relacionada con la predicción de disponibilidad del mismo por razones meteorológicas o por razones intrínsecas al propio observatorio, las funciones objetivo y coste que definen el problema multiobjetivo mejoran. De ese análisis se deriva que los distintos algoritmos de decisión puntúen a los telescopios eligiendo aquél que tenga una mayor puntuación.

Así mismo, en el apartado 7.5.2, en el que se comparan las prestaciones de los distintos algoritmos de decisión se constata que el tipo de tecnología base de cada algoritmo determina las prestaciones del mismo y por tanto del planificador en sí.

- **Hipótesis 2. El entorno de simulación se puede basar en un sistema de eventos discretos, modelando la red a partir de datos reales.**

Se ha desarrollado un entorno de simulación basado en un sistema de eventos discreto validado en el apartado 7.5.1 a partir de los datos reales de la red GLORIA durante un período de tiempo determinado de su funcionamiento. Se valida tanto el modelo utilizado para el perfil de aceptación de observaciones por parte de los telescopios como el modelo completo de la red basado en un sistema de eventos discretos. Todos los detalles del entorno de simulación se encuentran en el capítulo 6.

- **Contribución 1. Diseño, desarrollo y puesta en producción de un planificador para una red de telescopios heterogénea.**

Se ha diseñado un planificador de red de telescopios heterogénea basado en capas que cumple con los dos objetivos fijados. Todo el diseño se detalla a lo largo del capítulo 4, mientras que las tecnologías utilizadas para su implementación se muestran en el apartado 7.2. Este planificador fue desplegado para ser utilizado en la red de telescopios GLORIA y los resultados obtenidos durante su uso por parte de los usuarios de la red pueden verse en el apartado 7.3.

- **Contribución 2. Definición de diferentes algoritmos de decisión para la planificación.**

El análisis del problema multiobjetivo llevado a cabo en el apartado 5.1 concluye que la decisión del telescopio que ejecutará la observación es clave para la consecución de los objetivos fijados. De ahí, que se hayan desarrollado 3 algoritmos de decisión de telescopios con distintas tecnologías y que posteriormente se hayan comparado para decidir cual de ellos ofrece un mejor rendimiento. Los distintos algoritmos se detallan a lo largo de los apartados 5.2, 5.3 y 5.4; y la comparativa de los mismos en el apartado 7.5.2.

- **Contribución 3. Desarrollo de un entorno de simulación.**

Se ha diseñado y desarrollado en entorno de simulación basado en eventos discretos y que ha sido utilizado para comparar adecuadamente, bajo las mismas condiciones, los tres algoritmos de decisión propuestos. Todo el diseño aparece detallado a lo largo del capítulo 6, mientras que la implementación puede verse en el apartado 7.4 y la comparación de los algoritmos en el apartado 7.5.2.

8.3. Publicaciones

El trabajo realizado ha dado lugar a distintas publicaciones: dos artículos en revistas de impacto y cuatro publicaciones en congresos internacionales. A continuación aparece la información de las mismas.

- López-Casado, C., Pérez del Pulgar, Muñoz, V.F., Castro-Tirado A.
“Observation Scheduling and Simulation in a Global Telescope Network”
Future Generation Computer System, vol. 95, pp. 116-125, 2019
<https://doi.org/10.1016/j.future.2018.12.066>
(JCR impact factor: 6.125, Q1)
- López-Casado, C., Pérez del Pulgar, Muñoz, V.F., Castro-Tirado A.
“GISch: Planificación de Observaciones en la red de Telescopios GLORIA”
Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial, vol. 15,
pp. 339-350, 2018
<https://doi.org/10.4995/riai.2018.8640>
(JCR impact factor: 1,036, Q3)
- López-Casado, C., Pérez del Pulgar, Fernandez, E., Muñoz, V.F.,
Castro-Tirado A.
“GLSCH: observation scheduler for the GLORIA telescope network”
Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica, vol. 52, pp. 111-115, 2019
<https://doi.org/10.22201/ia.14052059p.2019.51.18>
- López-Casado, C., Pérez del Pulgar, Muñoz, V.F.
“Development of a scheduler for heterogeneous telescope networks with
different decision algorithms”
Trends in Practical Applications of Scalable Multi-Agent Systems, the PAAMS Co-
llection. Springer International Publishing, pp. 375-378, 2016
https://doi.org/10.1007/978-3-319-40159-1_33
- López-Casado, C., Pérez del Pulgar, C.J., et al.
“A fuzzy logic based decision algorithm for a heterogeneous telescope
network”
Industrial Technology (ICIT), 2015 IEEE International Conference on,
pp. 1814-1819, 2015
<https://doi.org/0.1109/ICIT.2015.7125360>

- López-Casado, C., Pérez del Pulgar, C.J., et al.
“GISch: a novel scheduler for a heterogeneous telescope network”
Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on Applied Computing,
pp. 2263-2270, 2015
<https://doi.org/10.1145/2695664.2695842>

8.4. Líneas futuras

El trabajo presentado en esta tesis podría ser completado y/o mejorado de diversas maneras que se exponen a continuación:

- **Adaptación del planificador para considerar eventos astronómicos tales como GRBs, ondas gravitacionales, etc.**

Actualmente el planificador no implementa ningún interfaz por el que se puedan recibir eventos de alta prioridad como pueden ser GRBs u ondas gravitacionales. Junto con este interfaz habría que diseñar e implementar la política de observación a seguir, puesto que posiblemente será distinta a la de elección de un único telescopio.

- **Desarrollo de nuevas técnicas para el algoritmo de decisión.**

Estudio y comparativa de nuevas técnicas de aprendizaje automático, tales como redes neuronales, máquinas de soporte vectorial (SVM), etc., para ser utilizadas en algoritmo de decisión de telescopio y que permitan mejorar los resultados obtenidos con los hasta ahora implementados.

- **Establecimiento de prioridades en las observaciones**

La petición de observación podría incluir un parámetro de prioridad adicional. Dependiendo del valor de este parámetro el planificador tendría que gestionar con mayor o menor prioridad las peticiones recibidas, lo que conllevaría una modificación en los algoritmos de decisión que permitieran tener en cuenta este parámetro.

- **Peticiones con más de un objeto a observar y/o con repeticiones de una observación**

La petición de observación podría incluir una lista de objetos a observar o un campo que indicase que una misma observación se quiere repetir un número determinado de veces. Estas modificaciones en la petición de observación implicarían una modificación en la gestión general del planificador para poder integrarlas. Asimismo, conllevarían la definición de nuevas políticas de decisión del o de los telescopios que se harían cargo de las observaciones.



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

Apéndice A

Diseño UML

Este apéndice muestra algunos detalles del diseño UML del planificador descrito en el capítulo 4. En concreto se incluyen los diagramas de secuencia y el esquema XSD de las peticiones de observación.

A.1. Diagramas de secuencia

El proceso de gestión de peticiones de observación que se ha descrito en el apartado 4.5 queda definido por los dos diagramas de secuencia UML que aparecen en las figuras A.1 y A.2. Los diagramas de secuencia muestran la interacción existente entre los distintos elementos de un sistema, en este caso del planificador que se ha desarrollado. Como puede verse en dichas figuras, en estos diagramas aparecen los elementos que intervienen y a que nodo de la arquitectura pertenecen. Estos elementos son principalmente los distintos componentes de la arquitectura que se presentaron en el capítulo 4 y que aparecen en la figura 4.1. Adicionalmente a ellos se ha incluido la interacción con la base de datos del sistema.

La figura A.1 muestra todo el proceso desde que una petición es enviada por un usuario hasta que es ofrecida a un telescopio. Por el contrario, la figura A.2 muestra el proceso que se desencadena tras pedir el estado de una observación ya ofrecida a un telescopio, incluyendo el caso en el que la observación haya finalizado correctamente y el caso en el que el telescopio no haya podido completarla.

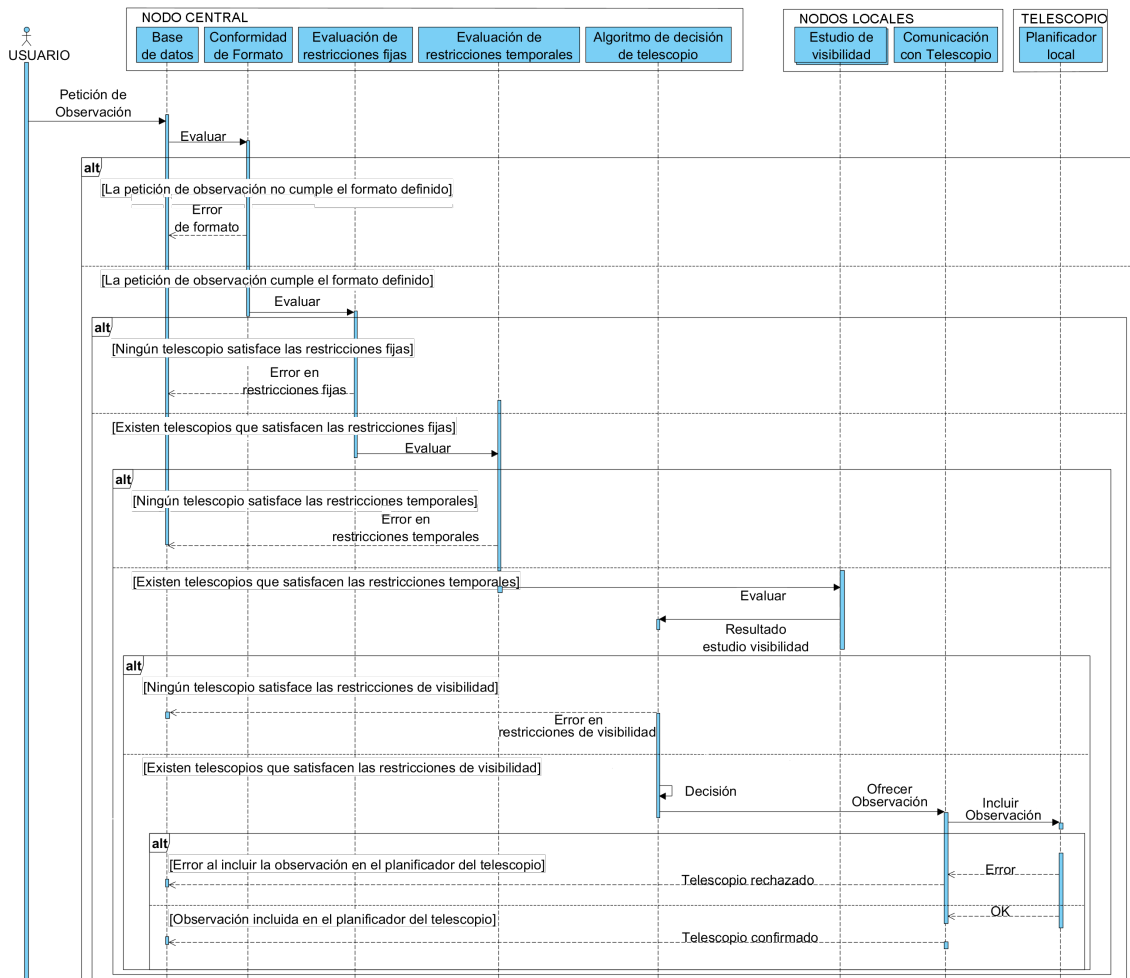


FIGURA A.1: Diagrama de secuencia asociado a la petición de una observación.



A.2. XSD

En la figura A.3 aparece el esquema XSD utilizado para la definición de las peticiones de observación. Se puede observar cómo aparecen las tres partes en las que está dividida la petición de observación: metadatos, restricciones e instrucciones. También aparecen los elementos que componen cada una de estas partes, el tipo de dato utilizado y la obligatoriedad o no de su uso. Este último dato es reflejado en el esquema con los números que aparecen entre corchetes. El número de la izquierda indica el número mínimo de ocurrencias del elemento y el de la derecha el número máximo. De manera que un [0..1] indica no obligatoriedad y un [1..1] indica obligatoriedad.

También puede verse que hay elementos que pueden ser completados con dos tipos de parámetros, siendo esto indicado por un símbolo a la izquierda en forma de corchete con tres opciones. Uno de ellos, por ejemplo es la información de la altitud del objeto

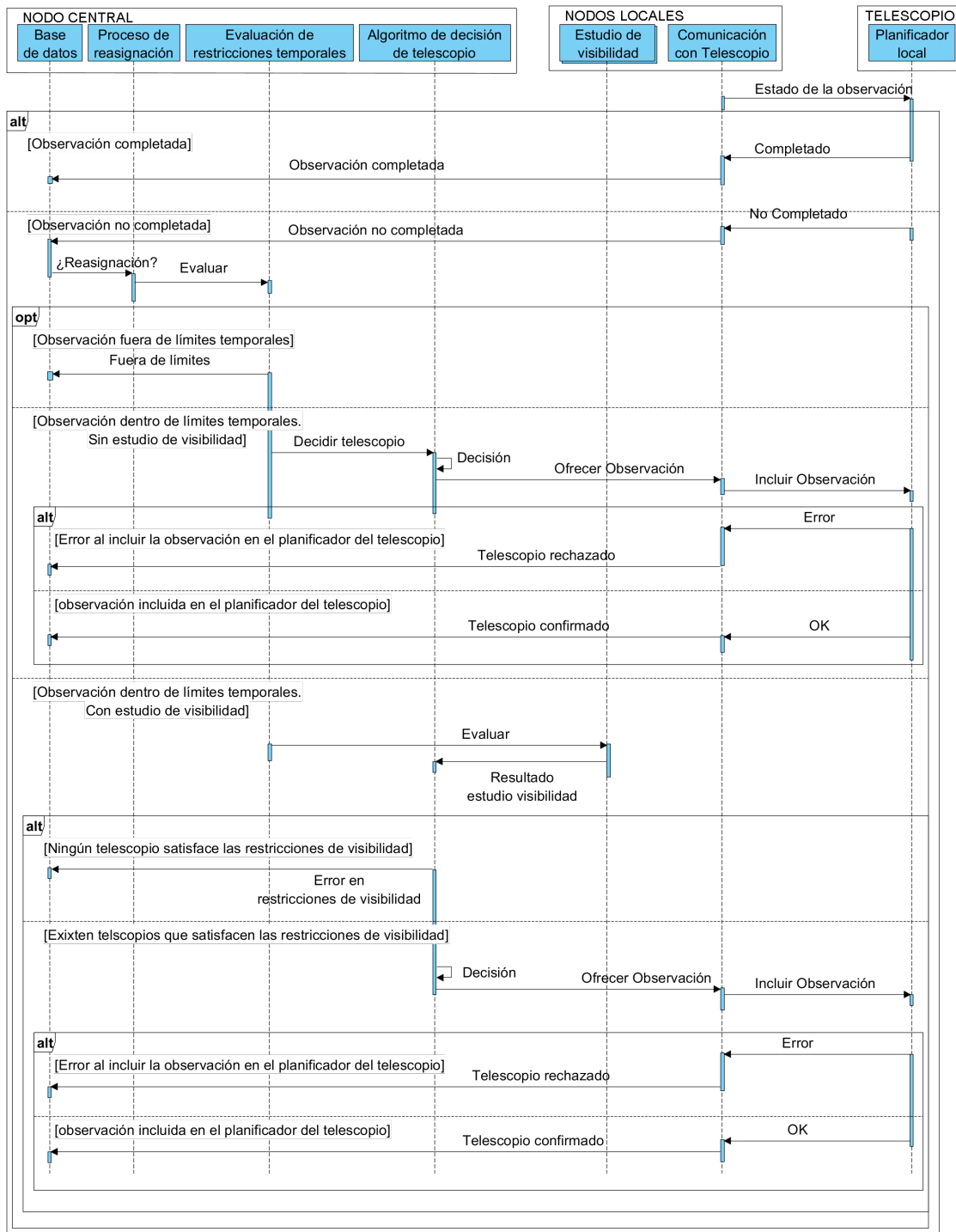


FIGURA A.2: Diagrama de secuencia asociado a la obtención del resultado de una observación ofrecida a un telescopio.



(*targetAltitudeInfo*), ésta puede ser indicada a través del propio valor de altitud del objeto (*targetAltitude*) o a través de la masa de aire (*airmass*).

Tanto la obligatoriedad de los elementos como la posibilidad de un mismo campo de ser completado con distinta información es debido a la definición de parámetros avanzados y básicos como se indicó en el apartado 4.2.

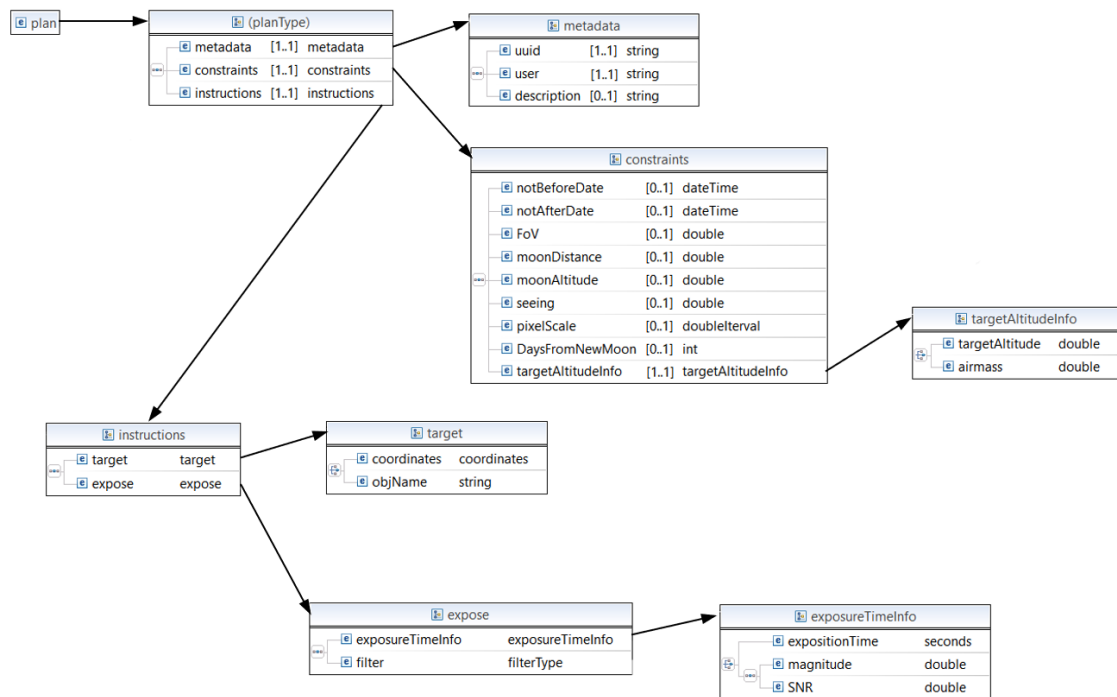


FIGURA A.3: Esquema XSD de la petición de observación.

Apéndice B

Lógica Difusa

La lógica difusa es una forma de lógica pluralente en la que los valores de verdad de las distintas variables deben ser un número real entre 0 y 1.

El concepto básico que subyace es el de una variable lingüística, es decir, una variable cuyos valores son palabras en lugar de números, es decir se trabaja con valores cualitativos en vez de con valores cuantitativos. Aunque las palabras son intrínsecamente menos precisas que los números, su uso está más cerca de la intuición humana.

B.1. Conjuntos difusos

La lógica difusa está directamente relacionada con la teoría de conjuntos difusos, una teoría que se relaciona con clases de objetos con límites poco definidos en los que la pertenencia es una cuestión de grado. En la teoría de conjuntos clásica, no se permite que un elemento esté en un conjunto (1) o no esté (0) al mismo tiempo, sin embargo, en la teoría de conjuntos difusos se aceptan valores parciales de pertenencia.

El grado de pertenencia de un elemento a un conjunto viene indicado por un valor comprendido entre 0 y 1. Se definen, por tanto, funciones que indican el grado de pertenencia de cada uno de los elementos con respecto a un conjunto en concreto (*membership functions*). La única condición que deben cumplir estas funciones es que varíen entre 0 y 1. La función en sí misma puede ser una curva arbitraria cuya forma se puede definir atendiendo a factores de simplicidad, conveniencia, velocidad o eficiencia.

Las funciones de pertenencia más simples son aquellas formadas a través de líneas rectas, como la función triangular o trapezoidal. Si se necesitan curvas más suaves se pueden utilizar funciones gaussianas o de campana. Todas ellas parten de 0, crecen hasta



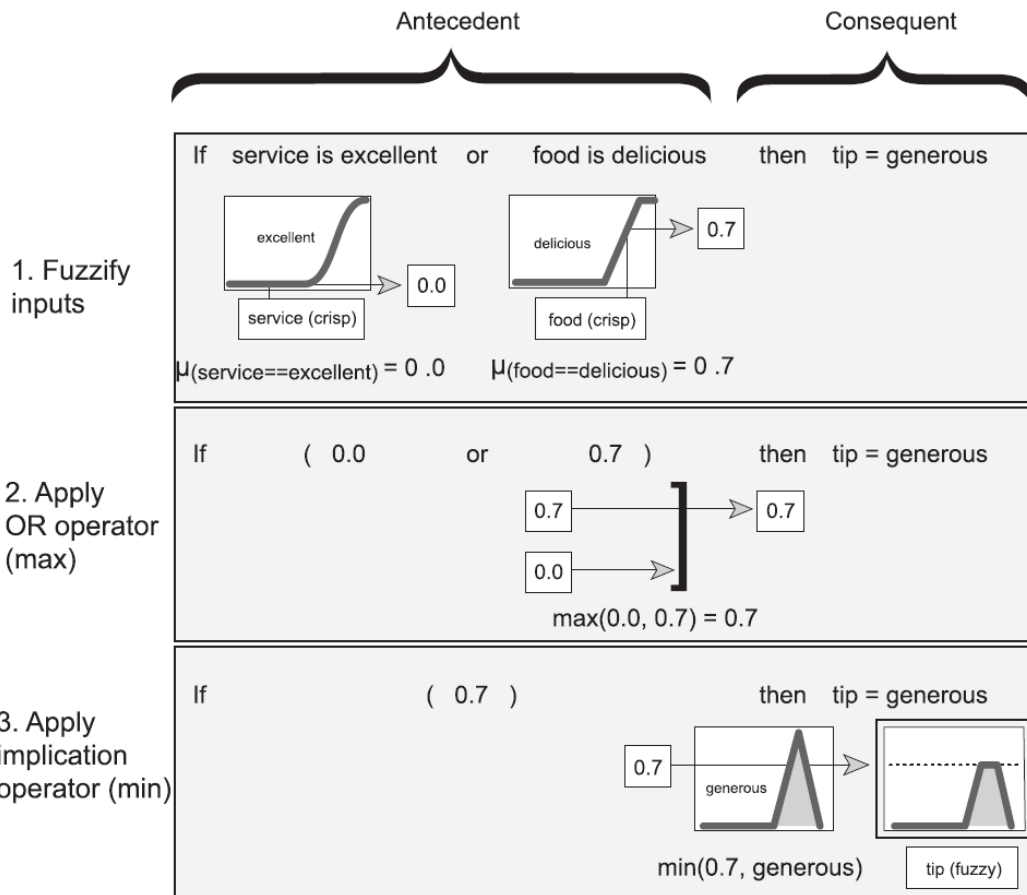


FIGURA B.1: Interpretación de las reglas *if-then* (Mathworks, 2020).

alcanzar un valor próximo al 1 y vuelven a decaer hasta el 0. Si se necesitan funciones que sean sólo transiciones del 0 al 1 o viceversa se puede utilizar la función sigmoide.

La teoría de conjuntos difusos permite también operaciones de unión, intersección, diferencia, negación o complemento que se pueden asociar con los operadores booleanos AND, OR y NOT.

B.2. Proceso de inferencia difusa

La inferencia difusa es el proceso en el que se mapea una serie de entradas a una salida usando lógica difusa. El mapeo proporciona una base a partir de la cual se pueden tomar decisiones o discernir patrones.

Este proceso se basa inicialmente en la definición de reglas *if-then* que relacionan antecedentes con consecuencias. Tanto los antecedentes como las consecuencias se definen como conjuntos difusos, puros o resultados de operaciones sobre ellos.

La interpretación de estas reglas se hace en tres partes (Fig. B.1). El primer paso es determinar para cada una de las entradas el grado en que pertenecen a cada uno de los conjuntos difusos apropiados a través de las funciones de pertenencia. A continuación se aplican los operadores lógicos que aparezcan en los antecedentes de manera que se obtenga un único valor comprendido entre 0 y 1, este valor es el grado de apoyo de la regla. Por último, se modifica el conjunto difuso asociado a la consecuencia en función del grado de apoyo de la regla. Si este valor es inferior a 1, la función de pertenencia es troncada.

En general, una sola regla no es eficaz, se necesitan dos o más reglas. Como el resultado de cada regla es un conjunto difuso, éstos se agregan en uno único de salida. Finalmente, el conjunto resultante se resuelve, es decir se obtiene en un único valor numérico de salida.



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

Apéndice C

Modelo de regresión lineal generalizada

Los modelos de regresión en general intentan predecir el valor de una variable a partir de un conjunto de variables observables. Los modelos de regresión lineal generalizada (GLM) son una clase especial de modelos no lineales, que sin embargo utilizan métodos lineales para su obtención.

Los modelos de regresión lineal generalizada son una generalización flexible de los modelos de regresión lineal que permiten que la variable de respuesta tenga una distribución distinta a la distribución normal. Los GLM generalizan la regresión lineal permitiendo una relación entre el modelo lineal y la variable de respuesta a través de una función de enlace. En concreto, estos modelos quedan definidos por tres componentes:

- **Componente aleatorio.** Una variable de respuesta aleatoria, Y , de observaciones independientes. Su función de distribución ha de pertenecer a la familia exponencial, es decir, debe ser una distribución normal, binomial, de Poisson, Gamma, etc.
- **Un predictor lineal.** Una combinación lineal de los predictores a utilizar en el modelo.

$$\eta_i = \beta_0 + \beta_1 \cdot X_{i1} + \beta_2 \cdot X_{i2} + \dots + \beta_k \cdot X_{ik} \quad (\text{C.1})$$

donde X_{ij} es el valor del j -ésimo predictor en la i -ésima observación. Estos predictores pueden ser variables observables directas o funciones de varias variables para modelizar interacciones entre ellas. Por otro lado, los parámetros β_j son los coeficientes de la regresión que han de estimarse.

- **Una función invertible de enlace.** Esta función de enlace relaciona la esperanza de la variable de respuesta aleatoria, $\mu_i \equiv E(Y_i)$, con el predictor lineal.

$$g(\mu_i) = \alpha + \beta_1 \cdot X_{i1} + \beta_2 \cdot X_{i2} + \cdots + \beta_k \cdot X_{ik} \quad (\text{C.2})$$

Como esta función de enlace es invertible, la esperanza de cada realización puede obtenerse como:

$$\mu_i = g^{-1}(\alpha + \beta_1 \cdot X_{i1} + \beta_2 \cdot X_{i2} + \cdots + \beta_k \cdot X_{ik}) \quad (\text{C.3})$$

La familia exponencial, a la que pertenecen las distribuciones normales, de Poisson, binomial y Gamma, pueden ser escritas según la forma:

$$f(y; \theta, \phi) = \exp \left[\frac{y\theta - b(\theta)}{a(\phi)} + c(y, \phi) \right] \quad (\text{C.4})$$

donde

- $f(y; \theta, \phi)$ es la función de probabilidad de una variable discreta aleatoria Y o la densidad de probabilidad si la variable Y es continua.
- $a(\cdot), b(\cdot), c(\cdot)$, son funciones conocidas que varían según el tipo de distribución.
- $\theta = g_c(\mu)$, es el parámetro canónico para la distribución concreta. Es una función de la esperanza de Y , $\mu \equiv E(Y)$. Además, la función de enlace canónica, $g_c(\cdot)$, no depende de ϕ .
- $\phi > 0$ es el parámetro de dispersión. En algunas distribuciones es un valor fijo conocido, sin embargo en otras es un parámetro que tiene que ser estimado junto con θ a partir de los datos disponibles.

Aunque en los modelos de regresión lineal generalizada se puede utilizar cualquier tipo de función de enlace, la función de enlace canónica asociada a cada distribución simplifica el modelo. En la tabla C.1 se muestran las funciones de enlace canónicas para cada una de las funciones de distribución más comunes.

Nótese que si se utiliza la función identidad, asociada a la distribución normal, se estaría particularizando para un modelo de regresión lineal. Por otro lado, en el caso de

la distribución binomial con datos binarios, también llamada distribución de Bernoulli, la media de la variable de respuesta coincide con la probabilidad de éxito.

TABLA C.1: Funciones de enlace.

Distribución	Función de enlace canónica	Descripción $g_c(\mu)$
Normal	Identidad	μ
Binomial	Logit	$\log_e\left(\frac{\mu}{1-\mu}\right)$
Poisson	Log	$\log_e(\mu)$
Gamma	Inversa	μ^{-1}
Gaussiana Inversa	Cuadrática inversa	μ^{-2}

Los valores del predictor lineal, β_j , se obtienen a través de la estimación de máxima verosimilitud que requiere un proceso computacional iterativo. Existen muchos métodos iterativos para estimar dichos valores, siendo el método IRLS (*Iterative Re-weighted Least Squares*) uno de los más eficientes y usados.

Para una variable de respuesta con n observaciones, y_1, \dots, y_n , la función de verosimilitud logarítmica queda definida como:

$$\log_e L(\theta, \phi; y) = \sum_{i=1}^n \frac{y_i \theta_i - b(\theta_i)}{a_i(\phi)} + c(y_i, \phi) \tag{C.5}$$

La estimación de máxima verosimilitud del predictor lineal se obtiene resolviendo las siguientes ecuaciones:

$$\sum_{i=1}^n \frac{y_i - \mu_i}{a_i v(\mu_i)} \times \frac{d\mu_i}{d\eta_i} \times X_{ij} = 0 \tag{C.6}$$

donde $a_i \equiv a_i(\phi)$ y $v(\mu_i) = d^2 b(\theta) / d\theta^2$.

Si se utilizan las funciones de enlace canónicas la ecuación C.6 queda simplificada de la siguiente manera:

$$\sum_{i=1}^n \frac{y_i X_{ij}}{a_i} = \sum_{i=1}^n \frac{\mu_i X_{ij}}{a_i} \tag{C.7}$$

Como se ha indicado anteriormente, la ecuación C.6, o la C.7, se suele resolver utilizando el método IRLS. Este método se basa en seguir los siguientes pasos:



1. Comenzar con unos valores iniciales estimados de $\mu_i^{(0)}$
2. Calcular $z_i^{(r)}$ y $w_i^{(r)}$ según:

$$\begin{aligned} z_i^{(r)} &= \eta_i^{(r)} + (y_i - \mu_i^{(r)})g'(\mu_i^{(r)}) \\ w_i^{(r)} &= \frac{1}{\left[g'(\mu_i^{(r)})\right]^2 a_i v(\mu_i^{(r)})} \end{aligned} \quad (\text{C.8})$$

siendo $g'(\mu_i^{(r)}) = d\eta_i / d\mu_i^{(r)}$ y $v(\mu_i) = d^2b(\theta) / d\theta^2$.

3. Aplicar mínimos cuadrados ponderados con los pesos $w_i^{(r)}$ para obtener el predictor lineal.
4. Repetir los pasos 2 y 3 hasta la convergencia del predictor lineal.

Glosario de términos

BOOTES	B urst O bserver and O ptical T ransient E xploring S ystem
TAROT	T élescopes à A ction R apide pour les O bjets T ransitoires
MASTER	Red de telescopios de Rusia
LCOGT	L as C umbres O bservatory G lobal T elescope N etwork
GLORIA	G LObal R obotic-telescopes I ntelligent A rray for e- S cience
RTS2	R emote T elescope S ystem
ACP	O bservatory C ontrol S oftware de DC-3 dream
SimEvents	S imulador de eventos discretos de Matlab
IAA-CSIC	I nstituto de A strofísica de A ndalucía
UML	U nified M odeling L anguage
GRB	G amma-ray b urst
Skynet	Red de telescopios de la Univ. de Carolina del Norte
HatSouth	Red de telescopios húngara
FTN	T he F alcon T elescope N etwork
STEM	S cience, T echnology, E ngineering and M athematics
OWL	O ptical W ide-field patrol- N etwork
SSA	S pace S ituational A wareness
CESAR	C ooperation through E ducation in S cience and A stronomy R esearch
ESA	E uropean S pace A gency
INTA	I nstituto N acional de T écnica A eroespacial
ISDEFE	I ngeniería de S istemas para la D efensa de E spaña
JSP	J ob- S hop P roblem
FJSP	F lexible- J SP
ALMA	A tacama L arge M illimeter/submillimeter A rray
CTA	C herenkov T elescope A rray

LSST	Large Synoptic Survey Telescope
CARMENES	Calar Alto high-Resolution search for M-dwarfs with Exo-earths with Near-infrared and optical Echelle Spectrographs
NASA	National Aeronautics and Space Administration
JWST	James Webb Space Telescope
SNR	extbfSignal-to-extbfNoise extbfRatio
LTP	Long Term Planner
STP	Short Term Planner
GDS	Guarded Discrete Stochastic
SB	Scheduling Block
LTS	Long Term Slot
MILP	Mixed Integer Linear Programming
GCN	Gamma-ray burst Circular Network
CAHA	Observatorio de Calar Alto
GLAST	Gamma-ray Large Area Space Telescope
CERN	Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire
HEP	High Energy Physics
DSS	Digital Sky Survey
XML	Extensible Markup Language
RTML	The Remote Telescope Markup Language
RA	Ascensión Recta
DEC	Declinación
M2M	Machine to Machine
CCD	Charge-Coupled Device
JAVA	Lenguaje de programación
SOAP	Simple Object Access Protocol
HTTPS	Hypertext Transfer Protocol Secure
XSD	XML Schema Definition
TOMCAT	Contenedor web de Apache
MySQL	Sistema de gestión de bases de datos relacional desarrollado por Oracle



JDBC	Java Database Connectivity
Hibernate	herramienta de mapeo objeto-relacional para Java
Libnova	Librería para cálculos asociados a astronomía y astrodinámica
JSON	JavaScript Object Notation
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
SVM	Support Vector Machine
GLM	Generalized Linear Model



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

Notación

A_G	Conjunto de telescopios disponibles en la red GLORIA
T_i	Telescopio i-ésimo de la red GLORIA
O_N	Conjunto de N observaciones
O_i	Observación i-ésima
$T_{acep}(O_N)$	Tasa de aceptación para el grupo de observaciones O_N
A_i	Conjunto de S telescopios donde la observación O_i puede ser ejecutada
$m(O_i, T_j)$	Función de disponibilidad del telescopio por factores meteorológicos dados una observación y un telescopio determinados
$d(O_i, T_j)$	Función de disponibilidad del telescopio por sí mismo dados una observación y un telescopio determinados
$M(O_N)$	Media del número de saltos en el peor caso para el grupo de observaciones O_N
$\hat{m}(O_i, T_j)$	Función predicha de disponibilidad del telescopio por factores meteorológicos dados una observación y un telescopio determinados
$\hat{d}(O_i, T_j)$	Función predicha de disponibilidad del telescopio por sí mismo dados una observación y un telescopio determinados
A'_i	Conjunto de todos los telescopios cuya predicción sobre la observación O_i es positiva
$\hat{T}_{acep}(O_N)$	Tasa de aceptación predicha para el grupo de observaciones O_N
$\hat{M}(O_N)$	Media del número de saltos en el peor caso predicha para el grupo de observaciones O_N
A''_i	Conjunto de S telescopios cuya predicción sobre la observación O_i es positiva

$Y(F, g)$	Función que genera un subconjunto del conjunto F con una cardinalidad máxima de g elementos
φ_j^i	Puntuación del telescopio T_j para la observación O_i
φ_K	Conjunto de puntuaciones de los telescopios del conjunto A_i
α	Predicción meteorológica
β	Visibilidad astronómica
P	Número de intervalos de 3 horas considerados para el cálculo de los parámetros en el algoritmo meteorológico
δ_l	Variable binaria que indica si hay precipitación de algún tipo en el intervalo l
τ_l	Variable entera que indica el nivel de nubosidad en el intervalo l
ξ_l	Variable entera que indica el valor del <i>seeing</i> en el intervalo l
ρ	Altitud del tránsito del objeto
ϕ	Puntuación del usuario
ω	Tasa de aceptación del telescopio
η	Aceptación de una observación por parte de un telescopio
$P(\eta \alpha, \beta)$	Probabilidad condicional de que se acepte una observación por parte de un telescopio, dado un par de valores específicos para la predicción meteorológica y la visibilidad astronómica
μ	Respuesta media del modelo de regresión lineal generalizada
a, b, c	Parámetros del modelo de regresión lineal generalizada
$\Phi_{petición\ usuario}$	Función de distribución de probabilidad de la variable puntuación de usuario
$\Phi_{numTelescopios}$	Función de distribución de probabilidad del número de telescopios disponibles por observación
$\Phi_{idTelescopios}$	Función de distribución de probabilidad de los identificadores de los telescopios disponibles por observación
$\Phi_{altitud\ Tránsito}$	Función de distribución de probabilidad de la variable altitud de tránsito del objeto
Φ	Función de distribución normal utilizada para modelar la predicción meteorológica y la visibilidad astronómica

y	Probabilidad de ocurrencia de aceptación en el modelo del telescopio
S	Número de pasos de reasignación



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

Bibliografía

Abbott, B. P., Abbott, R., Abbott, T. D., et al., 10 2017. Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger. *The Astrophysical Journal*

DOI: 10.3847/2041-8213/aa91c9

Arnab, R., 1 2017. Simple Random Sampling. In: *Survey Sampling Theory and Applications*. Academic Press, Ch. 3,

URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128118481000030>

DOI: 10.1016/B978-0-12-811848-1.00003-0

Arregui, J. P., Tejo, J. A., Linares López, C., Borrajo, D., 2012. Steps Towards an Operational Sensors Network Planning for Space Surveillance. In: *SpaceOps*.

URL: arc.aiaa.org/doi/pdf/10.2514/6.2012-1294728

DOI: 10.2514/6.2012-1294728

Bakos, G. A., Csubry, Z., Penev, K., et al., 2 2013. HATSouth: A Global Network of Fully Automated Identical Wide-Field Telescopes¹. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*

URL: <http://arxiv.org/abs/1206.1391><http://dx.doi.org/10.1086/669529><http://iopscience.iop.org/article/10.1086/669529>

DOI: 10.1086/669529

Bigongiari, C., Consortium, C., 2016. The Cherenkov Telescope Array. *Nuclear and Particle Physics Proceedings*

DOI: 10.1016/j.nuclphysbps.2016.10.025

Boër, M., Klotz, A., Laugier, R., et al., 2017. TAROT: a network for space surveillance and tracking operations.



Brown, T. M., Baliber, N., Bianco, F. B., et al., 9 2013. Las Cumbres Observatory Global Telescope Network. Publications of the Astronomical Society of the Pacific

URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1086/673168>

DOI: 10.1086/673168

Bucher, S., Williams, B., Pendexter, M., Balke, D., Flight, C., 2008. Chandra Mission Scheduling On-Orbit Experience.

URL: <http://cxc.cfa.harvard.edu/cda/SPIE/bucher2008.pdf>

Cackett, E. M., Chiang, C.-Y., McHardy, I., et al., 4 2018. Accretion Disk Reverberation with Hubble Space Telescope Observations of NGC 4593: Evidence for Diffuse Continuum Lags. The Astrophysical Journal

URL: <http://stacks.iop.org/0004-637X/857/i=1/a=53?key=crossref.534556463e67e30872d96bd26cf5fd21>

DOI: 10.3847/1538-4357/aab4f7

Cassandras, C. G., Lafortune, S., 2008. Introduction to Discrete Event Systems.

URL: <http://link.springer.com/10.1007/978-0-387-68612-7>

DOI: 10.1007/978-0-387-68612-7

Castro-Tirado, A. J., Jelínek, M., Gorosabel, J., et al., 2012. Building the BOOTES worldwide Network of Robotic telescopes. In: Astronomical Society of India Conference Series. Vol. 7.

Castro-Tirado, A. J., Moreno, F. M., Del Pulgar, C. P., et al., 2014. The global robotic telescopes intelligent array for e-Science (gloria). In: Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica: Serie de Conferencias. Vol. 45.

Cegarra Polo, M., Lambert, A., 2016. Towards a Network of Small Aperture Telescopes with Adaptive Optics Correction Capability.

URL: <https://amostech.com/TechnicalPapers/2016/Poster/Cegarra-Polo.pdf>

Choi, J., Jo, J., Yim, H.-S., et al., 6 2018. Optical Tracking Data Validation and Orbit Estimation for Sparse Observations of Satellites by the OWL-Net. Sensors

URL: <http://www.mdpi.com/1424-8220/18/6/1868>

DOI: 10.3390/s18061868

- Colomé, J., Colomer, P., Campreciós, J., et al., 8 2014. Artificial intelligence for the CTA Observatory scheduler. Vol. 9149. International Society for Optics and Photonics,
URL: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.2057090>
DOI: 10.1117/12.2057090
- Colome, J., Colomer, P., Guàrdia, J., et al., 9 2012. Research on schedulers for astronomical observatories. Vol. 8448. International Society for Optics and Photonics,
URL: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.926899>
DOI: 10.1117/12.926899
- Connolly, A. J., Angeli, G. Z., Chandrasekharan, S., et al., 8 2014. An end-to-end simulation framework for the Large Synoptic Survey Telescope. In: Angeli, G. Z., Dierickx, P. (Eds.), Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series. Vol. 9150. International Society for Optics and Photonics,
URL: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.2054953>
DOI: 10.1117/12.2054953
- Cuesta, L., Vaquerizo, J. A., 2013. CESAR: A ROBOTIC TELESCOPE NETWORK TO SCIENCE AND PUBLIC OUTREACH. In: II Workshop on Robotic Autonomous Observatories. Vol. 45.
URL: http://www.astroscu.unam.mx/rmaa/RMxAC..45/PDF/RMxAC..45_file5-03.pdf
- Delgado, F., Reuter, M. A., 7 2016. The LSST Scheduler from design to construction. In: Peck, A. B., Seaman, R. L., Benn, C. R. (Eds.), SPIE Astronomical Telescopes+ Instrumentation. International Society for Optics and Photonics,
URL: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.2233630>
DOI: 10.1117/12.2233630
- Denny, R., 2011. A Web-Remote/Robotic/Scheduled Astronomical Data Acquisition System. In: Telescopes from Afar Conference.



Di Pierro, F., Bigongiari, C., Stamerra, A., Vallania, P., Consortium, A. C., the CTA, 5 2016.

Expected performance of the ASTRI mini-array in the framework of the Cherenkov Telescope Array. *Journal of Physics: Conference Series*

URL: <http://stacks.iop.org/1742-6596/718/i=5/a=052008?key=crossref.b88a2fa0c98d6a6c1848634205fef07e>

DOI: 10.1088/1742-6596/718/5/052008

Dominik, M., Horne, K., Allan, A., et al., 1 2008.

URL: <http://arxiv.org/abs/0801.2162http://dx.doi.org/10.1002/asna.200710928>

DOI: 10.1002/asna.200710928

Eastman, J. D., Brown, T. M., Hygelund, J., van Eyken, J., Tufts, J. R., Barnes, S., 7 2014.

NRES: the network of robotic Echelle spectrographs. In: Ramsay, S. K., McLean, I. S., Takami, H. (Eds.), *Proc. SPIE, Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy V*. Vol. 9147. International Society for Optics and Photonics,

URL: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.2054699>

DOI: 10.1117/12.2054699

Falomo, R., Fantinel, D., Uslenghi, M., 9 2011. AETC: Advanced Exposure Time Calculator. *SPIE*

URL: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=1341831>

DOI: 10.1117/12.913304

Fox, J., 2015.

URL: https://books.google.es/books?hl=en&lr=&id=3wrwCQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT21&dq=generalized+linear+regression+model&ots=3z7mwjDkxk&sig=ThSu0Pp5N00uP2I_pu0N1Cn5uVg#v=onepage&q=generalizedlinearregressionmodel&f=false

Garcia-Piquer, A., Gù Ardia, J., Colomé, J., et al., 2014. CARMENES Instrument Control System and Operational Scheduler. In: *Proceedings of SPIE - Software and Cyberinfrastructure for Astronomy III*.

URL: <http://spie.org/manuscripts>

Garcia-Piquer, A., Morales, J. C., Ribas, I., et al., 2017. Efficient scheduling of astronomical observations. Application to the CARMENES radial-velocity survey. *Astronomy & Astrophysics*

URL: <https://www.aanda.org/articles/aa/pdf/2017/08/aa28577-16.pdf>

DOI: 10.1051/0004-6361/201628577

GCN: The Gamma-ray Coordinates Network

URL: <https://gcn.gsfc.nasa.gov/>

Giakoumidis, N., Ioannou, Z., Dong, H., Mavridis, N., 2013. DEVELOPING A TELESCOPE SIMULATOR TOWARDS A GLOBAL AUTONOMOUS ROBOTIC TELESCOPE NETWORK. *Publ. Astron. Obs. Belgrade No*

Giakoumidis, N., Mavridis, N., Ioannou, Z., 2012. Simulating an Autonomous and Global Robotic Telescope Network.

URL: [http://www.dr-nikolaos-mavridis.com/resources/34Simulatinganautonomousandglobalrobotictelescopenetwork\(poster\).pdf](http://www.dr-nikolaos-mavridis.com/resources/34Simulatinganautonomousandglobalrobotictelescopenetwork(poster).pdf)

Giuliano, M. E., Rager, R., Ferdous, N., 2011. Towards a Heuristic for Scheduling the James Webb Space Telescope. In: the international workshop on planning and scheduling for space, IWPSS.

URL: www.aaai.org

Gorbovskoy, E. S., Lipunov, V. M., Kornilov, V. G., et al., 4 2013. The MASTER-II network of robotic optical telescopes. First results. *Astronomy Reports*

URL: <http://link.springer.com/10.1134/S1063772913040033>

DOI: 10.1134/S1063772913040033

Gresham, K. C., Palma, C., Polsgrove, D. E., Chun, F. K., Della-Rose, D. J., Tippets, R. D., 12 2016. Education and outreach using the falcon telescope network. *Acta Astronautica*

URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0094576515302939>

Gurobi Optimizer

URL: <http://www.gurobi.com/downloads/licenses/license-center?campaignid=193468896&adgroupid=44825199975&creative=208923000662&keyword=>

gurobiooptimizer&matchtype=p&gclid=Cj0KCQjwxYLoBRCxARIsAEf16-u6H_
zwIZQZwjzx74kh98g5EG_75QdRo2u95xMlam6femCRgIFrn9oaAoZ0EALw_

Hamuy, M., Pignata, G., Maza, J., et al., 2012. The CHilean Automatic Supernova sEarch.

URL: <http://www.das.uchile.cl/>

HATSouth Home

URL: <https://hatsouth.org/>

Hessman, F. V., 9 2006. Remote Telescope Markup Language (RTML). *Astronomische Nachrichten*

URL: <http://doi.wiley.com/10.1002/asna.200610626>

DOI: 10.1002/asna.200610626

Hinze, A., Fiedler, H., 2016. Optimal Scheduling for Geosynchronous Space Object Follow-up Observations Using a Genetic Algorithm.

URL: www.amostech.com

Hope, D. A., 2014. A New Approach to Computing Information in Measurements of Non-Resolved Space Objects by the Falcon Telescope Network.

URL: <http://www.dtic.mil/docs/citations/ADA616742><http://adsabs.harvard.edu/abs/2014amos.confE..74H>

IBM ILOG CPLEX Optimization Studio | IBM

URL: <https://www.ibm.com/products/ilog-cplex-optimization-studio>

Jelínek, M., Castro-Tirado, A. J., Cunniffe, R., et al., 10 2016. A Decade of GRB Follow-Up by BOOTES in Spain (2003-2013). *Advances in Astronomy*

DOI: 10.1155/2016/1928465

Juric, M., Jones, R., Moeyens, J., Ivezić, Z., Slater, C., Team, L. D. M., 2017. LSST Data Products and Tools for Solar System Science. In: *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts*. Vol. 49.

Karpov, S., Beskin, G., Biryukov, A., et al., 2016. Mini-Mega-TORTORA wide-field monitoring system with sub-second temporal resolution: first year of operation. IV Workshop on Robotic Autonomous Observatories. *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica*



Klotz, A., Boer, M., Atteia, J., et al., 2013. Six Years of Science with the TAROT Telescope at La Silla. *The Messenger*, vol. 151, p. 6-9

URL: <http://adsabs.harvard.edu/abs/2013Msng...151...6K>

Kornilov, V. G., Lipunov, V. M., Gorbovskoy, E. S., et al., 3 2012. Robotic optical telescopes global network MASTER II. Equipment, structure, algorithms. *Experimental Astronomy*

URL: <http://link.springer.com/10.1007/s10686-011-9280-z>

DOI: 10.1007/s10686-011-9280-z

Kubánek, P., 7 2016. Status, upgrades, and advances of RTS2: the open source astronomical observatory manager. In: *SPIE Astronomical Telescopes+ Instrumentation*. International Society for Optics and Photonics,

URL: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.2232555>

DOI: 10.1117/12.2232555

Laas-Bourez, M., Coward, D., Klotz, A., Boër, M., 2 2011. A robotic telescope network for space debris identification and tracking. *Advances in Space Research*

URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117710006113>

DOI: 10.1016/J.ASR.2010.09.010

Lampoudi, S., Saunders, E., 2013. Telescope Network Scheduling: Rationale and Formalisms. In: *International Conference on Operations Research and Enterprise Systems (ICORES)*. Vol. 13.

Lampoudi, S., Saunders, E., Eastman, J., 2015. An Integer Linear Programming Solution to the Telescope Network Scheduling Problem.

URL: <http://arxiv.org/abs/1503.07170>

Las Cumbres Observatory

URL: <https://lco.global/>

Li, Z., Yuan, X., Cui, X., et al., 7 2018. Introduction of Chinese Antarctic optical telescopes. In: *Gilmozzi, R., Marshall, H. K., Spyromilio, J. (Eds.), Ground-based and Airborne Telescopes VII*. Vol. 10700. SPIE,

URL: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/10700/2309618/Introduction-of-Chinese-Antarctic-optical-telescopes/10.1117/12.2309618.full>
 DOI: 10.1117/12.2309618

Libnova: Celestial Mechanics, Astrometry and Astrodynamics Library

URL: <http://libnova.sourceforge.net/>

Lipunov, V., Kornilov, V., Gorbovskoy, E., et al., 2010. Master Robotic Net. *Advances in Astronomy*

URL: <http://www.hindawi.com/journals/aa/2010/349171/>

DOI: 10.1155/2010/349171

Mankiewicz, L., Batsch, T., Castro-Tirado, A., et al., 2014. Pi of the sky full system and the new telescope. In: *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica: Serie de Conferencias*. Vol. 45.

Martone, R., Guidorzi, C., Mundell, C. G., et al., 2019.

URL: <http://arxiv.org/abs/1907.00630><http://dx.doi.org/10.1007/s10686-019-09634-y>

DOI: 10.1007/s10686-019-09634-y

MASTER GLOBAL ROBOTIC TELESCOPES NET

URL: <http://observ.pereplet.ru/>

Mathworks, 2020. Fuzzy Logic Toolbox™ User's Guide R2020a.

URL: www.mathworks.com

Moser, I., van Straten, W., 2018. Dispatch approaches for scheduling radio telescope observations. *Experimental Astronomy*

URL: <http://link.springer.com/10.1007/s10686-018-9602-5>

DOI: 10.1007/s10686-018-9602-5

Free weather API | XML weather and JSON weather feed for global locations

URL: <http://www.myweather2.com>

Naylor, T., Allan, A., Steele, I., 2006. Heterogenous telescope networks: An introduction. *Astronomische Nachrichten*

URL: www.an-journal.org

DOI: 10.1002/asna.200610624

BART: The Czech autonomous observatory

DOI: 10.1155/2010/103986

Ocaña, F., Ibarra, A., Racero, E., Montero, A., Doubek, J., Ruiz, V., 7 2016. First results of the Test-Bed Telescopes (TBT) project: Cebreros telescope commissioning. In: Hall, H. J., Gilmozzi, R., Marshall, H. K. (Eds.), *SPIE Astronomical Telescopes+ Instrumentation*.

URL: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.2233142>

DOI: 10.1117/12.2233142

Ottinger, J. B., M. D. & L. J., 2014. *Beginning Hibernate*, 3rd Edition.

Panetta, M. P., 2016. The EEE Project: An extended network of muon telescopes for the study of cosmic rays. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*

DOI: 10.1016/j.nima.2015.10.073

Park, J.-H., Yim, H.-S., Choi, Y.-J., et al., 7 2018. OWL-Net: A global network of robotic telescopes for satellite observation. *Advances in Space Research*

URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117718302977>

DOI: 10.1016/J.ASR.2018.04.008

Pérez-Ayúcar, M., Breitfellner, M., Castillo, M., Merritt, D., 2018. The CESAR Education Initiative.

URL: <http://cesar.esa.int>.

DOI: 10.2514/6.2018-2340

Pickles, A., Hjelstrom, A., Boroson, T., et al., 8 2014. LCOGT network observatory operations. In: *SPIE Astronomical Telescopes+ Instrumentation*.

DOI: 10.1117/12.2055215

Proyecto PIIISA | Un proyecto para introducir la Ciencia y la Investigación en los institutos de secundaria andaluces

URL: <https://piiisa.es/>

Quirrenbach, A., Amado, P. J., Caballero, J. A., et al., 11 2016. CARMENES: an overview six months after first light. In: Evans, C. J., Simard, L., Takami, H. (Eds.), Proc. SPIE, Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy VI. Vol. 9908. International Society for Optics and Photonics,

URL: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.2231880>

DOI: 10.1117/12.2231880

Rabaza, O., Jelinek, M., Castro-Tirado, A. J., et al., 11 2013. Compact low resolution spectrograph, an imaging and long slit spectrograph for robotic telescopes. Review of Scientific Instruments

URL: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.4827895>

DOI: 10.1063/1.4827895

Racero, E., Ocaña, F., Ponz, D., 2015. Towards an autonomous telescope system: the Test-Bed Telescope project.

Rapp-Arrarás, , Domingo-Santos, J. M., 2011. Functional forms for approximating the relative optical air mass. J. Geophys. Res

URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2011JD016706>

DOI: 10.1029/2011JD016706

Reichart, D., Nysewander, M., Moran, J., et al., 2 2005. PROMPT: Panchromatic Robotic Optical Monitoring and Polarimetry Telescopes.

URL: <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0502429><http://arxiv.org/abs/astro-ph/0502429>

DOI: 10.1393/ncc/i2005-10149-6

Telescopio Rapid Eye Mount | ESO España

URL: <https://www.eso.org/public/spain/teles-instr/lasilla/rem/>

Riechers, D. A., Stacey, G., Giovanelli, R., et al., 2015. The CCAT 25m-class Submillimeter Telescope. IAU General Assembly, Meeting #29, id.2255781

URL: <http://adsabs.harvard.edu/abs/2015IAUGA...2255781R>

Saunders, E. S., 2007. Optimal Observing of Astronomical Time Series using Autonomous Agents. Ph.D. thesis,

URL: https://www.astro.ex.ac.uk/people/saunders/eric_saunders_thesis_final.pdf

Saunders, E. S., Lampoudi, S., Lister, T. A., Norbury, M., Walker, Z., 8 2014. Novel scheduling approaches in the era of multi-telescope networks. In: SPIE Astronomical Telescopes+ Instrumentation.

URL: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.2056642>

DOI: 10.1117/12.2056642

Sebag, J., Barr, J., Saha, A., Claver, C., Krabbendam, V., 2007. LSST CLOUD COVER MEASUREMENT FOR OBSERVATION SCHEDULING. In: Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica. Vol. 31.

URL: http://www.astroscu.unam.mx/rmaa/RMxAC...31/PDF/RMxAC...31_jsebag.pdf

Sesame Name Resolver

URL: <http://cds.u-strasbg.fr/cgi-bin/Sesame>

Simbad Home Page

URL: <http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>

Skynet Home

URL: <https://skynet.unc.edu/>

Skynet Junior Scholars

URL: <https://skynetjuniorscholars.org/>

Skynet University

URL: <https://skynet.unc.edu/introastro/>



Solar, M., Michelon, P., Avarias, J., Garces, M., 2016. A scheduling model for astronomy. *Astronomy and Computing*

DOI: 10.1016/j.ascom.2016.02.005

Sosnowska, D., Ouadahi, A., Buchschacher, N., Weber, L., Pepe, F., 2014. Using Heuristic Algorithms to Optimize Observing Target Sequences. In: *Astronomical Data Analysis Software and Systems XXIII*. Vol. 485.

Steele, I. A., Naylor, T., Allan, A., Etherton, J., Mottram, C. J., 11 2002. eSTAR: a distributed telescope network. In: Kibrick, R. I. (Ed.), *Proc. SPIE, Advanced Global Communications Technologies for Astronomy II*. Vol. 4845. International Society for Optics and Photonics,

URL: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=874850>

DOI: 10.1117/12.456601

Tarot Home

URL: <http://tarot.obs-hp.fr/>

Trillas, E., Eciolaza, L., 2015. Fuzzy Logic: An Introductory Course for Engineering Students. Vol. 320.

DOI: 10.1007/978-3-319-14203-6

Hands-On Universe

URL: <http://handsonuniverse.org/>

Volgenau, N., Boroson, T., 7 2016. Two years of LCOGT operations: the challenges of a global observatory. In: *SPIE Astronomical Telescopes+ Instrumentation*. International Society for Optics and Photonics,

URL: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.2233830>

DOI: 10.1117/12.2233830

Wetter, J., Akgun, O., Barker, A., Dominik, M., Miguel, I., Varghese, B., 8 2015. Cloud-based E-Infrastructure for Scheduling Astronomical Observations. In: *2015 IEEE 11th International Conference on e-Science*. IEEE,

URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7304319/>

DOI: 10.1109/eScience.2015.54

Ye, Q.-Z., 2011. Forecasting Cloud Cover and Atmospheric Seeing for Astronomical Observing: Application and Evaluation of the Global Forecast System. Publications of the Astronomical Society of the Pacific

URL: http://adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-data_query?bibcode=2011PASP..123..113Y&link_type=ABSTRACT%5Cnpapers3://publication/doi/10.1086/658201

DOI: 10.1086/658201

Zimmer, P., McGraw, J. T., Ackermann, M. R., 2015. Real-Time Surveillance of LEO and MEO with Small Optical Telescopes.





UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

Esta tesis propone el diseño y desarrollo de un planificador para la red de telescopios GLORIA. Esta red, cuyo principal objetivo es acercar los ciudadanos a la astronomía, está formada por 18 telescopios ubicados en cuatro continentes. Parte de la gestión de esta red se lleva a cabo por el planificador, que se encarga de recibir peticiones de observación de usuarios y enviárselas a uno de los telescopios de la red. Para esto, necesita un algoritmo que decida el mejor telescopio, evitando ofrecer una petición a un telescopio que finalmente no pueda ejecutarla. De este modo, se han diseñado y posteriormente evaluado tres algoritmos distintos de selección de telescopio. El primero se basa únicamente en la predicción meteorológica en la ubicación del observatorio; el segundo emplea más información que se engloba en un modelo de lógica difusa que realiza la decisión; por último, se ha diseñado un algoritmo probabilístico que adapta su decisión a los cambios que se produzcan en la red. Para realizar una adecuada comparación de los tres algoritmos hay que someterlos a las mismas condiciones, para ello se ha creado un modelo de la red de telescopios que ha sido validado a través de la información obtenida de la red real. La comparación realizada revela que el algoritmo probabilístico es el que obtiene mejor rendimiento en la red y obtiene la mejor optimización de los objetivos fijados, hecho constatado al comparar el frente de Pareto de los tres algoritmos.

