



Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

TRABAJO FIN DE GRADO

***ESTUDIO DE UN CONTROL PI
PARA LA ÓPTICA ADAPTATIVA DEL
TELESCOPIO SOLAR EUROPEO***

Autor: Daniel Reyes Darías

Tutor: José Manuel González Cava

Cotutor: Nicolás Adrián Rodríguez Linares (Instituto de Astrofísica de Canarias)

San Cristóbal de La Laguna, mayo 2024

Agradecimientos

Primeramente, me gustaría agradecer a mi tutor, el Dr. José Manuel González Cava, por darme la oportunidad de realizar este proyecto. Sin su confianza y su orientación nada de esto hubiera sido posible.

A mi cotutor Nicolás Adrián Rodríguez Linares, ingeniero de control en el IAC, por prestar su tiempo para asistirme en el proyecto y por desempeñar un papel esencial en la resolución de algunos problemas.

Al Instituto de Astrofísica de Canarias, por permitirme acceder a las instalaciones necesarias para llevar a cabo todas las actividades requeridas por el trabajo.

A mis compañeros de grado, en especial a Jacobo por aguantarme todos estos años.

Por último, pero especialmente importante, a Alejandro, Cristina y Sofía, quienes siempre han estado a mi lado.

Resumen

La óptica adaptativa es una técnica que permite corregir las aberraciones introducidas por la atmósfera en las imágenes astronómicas obtenidas desde la superficie terrestre. El problema de control en óptica adaptativa se centra en la actuación de espejos deformables capaces de modificar la forma de su superficie en tiempo real para contrarrestar los efectos de la atmósfera. Esta técnica será clave para el futuro Telescopio Solar Europeo (EST), que aspira a ser el telescopio solar más grande de Europa. En la actualidad, el equipo de ingeniería de EST trabaja en la propuesta y validación de un esquema de óptica adaptativa multiconjugada que permita alcanzar los requisitos científicos definidos para el telescopio. Hasta la fecha, la estructura de control empleada tanto en simulaciones como en el banco demostrador de EST ha estado basada en un leaky-integrator. El objetivo de este Trabajo Fin de Grado se centra en el análisis, implementación y validación en simulación de un controlador PI con el fin de comparar el rendimiento de la estrategia frente al actual leaky-integrator. Para ello, se llevará a cabo el análisis y la sintonización de los dos tipos de controladores. Finalmente, se empleará el software de simulación de óptica adaptativa DASP para la validación y comparación de ambas estrategias. Los resultados de este trabajo han evidenciado que, frente a la mejora teórica esperada con la introducción del controlador PI en la corrección a bajas frecuencias, la mejora obtenida en simulación por este controlador es limitada. Los análisis realizados en este trabajo apuntan a las interacciones entre elementos de actuación y sensado como potencial limitante del rendimiento de la estrategia de control. Estos resultados abren una nueva vía de estudio encaminada hacia la mejora del rendimiento de la estrategia de control para la óptica adaptativa del Telescopio Solar Europeo.

Palabras clave: Controlador PI; DASP; Leaky-integrator; Óptica adaptativa; Telescopio Solar Europeo.

Abstract

Adaptive optics is a technique for correcting aberrations introduced by the atmosphere in astronomical images obtained from the Earth's surface. The control problem in adaptive optics focuses on the performance of deformable mirrors capable of modifying the shape of their surface in real time to counteract the effects of the atmosphere. This technique will be key to the future European Solar Telescope (EST), which aims to be Europe's largest solar telescope. The EST engineering team is currently working on the proposal and validation of a multi-conjugate adaptive optics scheme to meet the scientific requirements defined for the telescope. To date, the control structure used both in simulations and on the EST testbed has been based on a leaky-integrator. The objective of this thesis focuses on the analysis, implementation and validation in simulation of a PI controller in order to compare the performance of the strategy against the current leaky-integrator. To this end, the analysis and tuning of the two types of controllers will be carried out. Finally, the DASP adaptive optics simulation software will be used to validate and compare the two strategies. The results of this work have shown that, compared to the theoretical improvement expected with the introduction of the PI controller in the correction at low frequencies, the improvement obtained in simulation by this controller is limited. The analyses carried out in this work point to the interactions between actuation and sensing elements as a potential source of limitation in the performance of the control strategy. These results open a new study line aimed at improving the performance of the control strategy for the adaptive optics of the European Solar Telescope.

Keywords: Adaptive Optics; DASP; European Solar Telescope; Leaky-integrator; PI controller.

Índice

Siglas y acrónimos	1
1. Introducción.....	3
1.1. Antecedentes	5
1.2. Motivación	6
1.3. Objetivos	7
1.4. Estructura del documento.....	8
2. Contexto y fundamentos teóricos.....	9
2.1. Óptica adaptativa en astrofísica.....	11
2.1.1. Principios de la óptica adaptativa.....	11
2.1.2 Esquemas de óptica adaptativa.....	13
2.2. Lazo de control para SCAO	16
2.2.1. Sensor de frente de onda	17
2.2.2. Espejo deformable.....	19
2.2.3. Controlador.....	21
2.2.4. Matriz de reconstrucción	22
3. Simulador DASP	23
3.1. Descripción general.....	25
3.2. Funcionalidades principales	25
3.3. Estructura del simulador.....	28
3.4. Clase “recon”	32
3.4.1. Leaky-integrator	33
3.5. Adaptación de DASP a SCAO para EST	34
4. Metodología	37
4.1. Procesamiento de la matriz de reconstrucción	39
4.2. Análisis y sintonización del leaky-integrator	43
4.3. Análisis y propuesta de un controlador PI.....	44
4.4. Implementación del controlador PI en DASP	47
4.5. Herramientas empleadas para la sintonización y el análisis de resultados.....	49
4.6. Métricas para la caracterización del rendimiento de la estrategia de control.....	50
5. Resultados	53
5.1. Análisis del efecto de la matriz de reconstrucción	55
5.2. Resultados de la simulación para el controlador leaky-integrator.....	58

5.3. Resultados de la simulación para el controlador PI	65
5.4. Influencia de las interacciones en el rendimiento del lazo de control	72
6. Conclusiones y líneas abiertas.....	79
6.1. Conclusiones	81
6.2. Líneas abiertas.....	82
7. Conclusions and future research lines.....	85
7.1. Conclusions	87
7.2. Future research lines.....	88
8. Presupuesto	91
Bibliografía	95

Siglas y acrónimos

Sigla	Denominación	Traducción
AO	Adaptive optics	Óptica adaptativa
DASP	Durham AO Simulation Platform	Plataforma de simulación de óptica adaptativa de Durham
DM	Deformable mirror	Espejo deformable
EST	European Solar Telescope	Telescopio Solar Europeo
GLAO	Ground-layer adaptive optics	Óptica adaptativa de capa de tierra
IAC	Instituto de Astrofísica de Canarias	-
MCAO	Multi-conjugate adaptive optics	Óptica adaptativa multiconjugada
MOAO	Multi-object adaptive optics	Óptica adaptativa de objeto múltiple
PI	Controlador proporcional-integral	-
PSD	Power spectral density	Densidad espectral de potencia
RMS	Root mean square	Raíz de la media cuadrática
SCAO	Single-conjugate adaptive optics	Óptica adaptativa conjugada simple
SR	Strehl ratio	Cociente de Strehl
WFS	Wavefront sensor	Sensor de frente de onda

1. Introducción

1.1. Antecedentes

En el ámbito de la Astrofísica, la óptica adaptativa es una técnica que permite corregir en tiempo real las distorsiones que se producen en las imágenes astronómicas debido a la atmósfera de la Tierra. Esto permite a los telescopios terrestres obtener imágenes más nítidas y detalladas de objetos celestes. Los inicios de la óptica adaptativa se remontan a 1989, cuando se probó el primer sistema de óptica adaptativa en el telescopio COME-ON de 3.6 m en el Observatorio de La Silla, en Chile, del European Southern Observatory (ESO). Este sistema empleó un espejo deformable conformado por 19 actuadores que alcanzaba las 100 correcciones por segundo. Este primer sistema fue mejorado por COME-ON+ y, más tarde, por ADONIS, que fue el primer sistema con una interfaz más accesible que permitió su uso sin la necesidad de un operario especializado. En este último, se usaron 52 actuadores para corregir las perturbaciones atmosféricas [1][2].

Tras los avances pioneros realizados con los sistemas COME-ON y ADONIS, la óptica adaptativa ha seguido evolucionando. Actualmente, el telescopio Very Large Telescope (VLT) del European Southern Observatory (ESO) se ha convertido en uno de los sistemas más avanzados en óptica adaptativa. Este telescopio consta de cuatro Telescopios Unitarios (Unit Telescopes, UTs) con espejo primario de 8,2 metros de diámetro más cuatro Telescopios Auxiliares (Auxiliary Telescopes, ATs) móviles de 1,8 metros de diámetro, los cuales trabajan en conjunto para formar un "interferómetro" gigante que permite ver detalles con 25 veces más precisión que con telescopios individuales de mayor tamaño [3][4]. Así, el VLT ha logrado importantes avances en la corrección de aberraciones atmosféricas, lo que ha sentado las bases para futuros desarrollos en el campo de la óptica adaptativa. Este progreso será clave para la próxima generación de telescopios extremadamente grandes (ELT, por sus siglas en inglés), como el Telescopio Europeo Extremadamente Grande (E-ELT), que se espera que lleve la óptica adaptativa a nuevos límites y abra nuevas oportunidades en la exploración del cosmos.

Aunque los principales avances realizados hasta la fecha han estado centrados en el desarrollo de óptica adaptativa para telescopios nocturnos, esta disciplina juega un papel clave en el diseño de telescopios solares. Actualmente, el telescopio americano Daniel K. Inouye Solar Telescope (DKIST) es el telescopio solar más grande del mundo, con un

espejo primario de 4,2 metros [5]. Este telescopio, que implementa uno de los sistemas de óptica adaptativa más complejos del mundo, alcanzó su primera luz a finales de 2019.

Por su parte, la comunidad científica europea está trabajando en el diseño y construcción del Telescopio Solar Europeo (EST, por sus siglas en inglés). Se trata de un telescopio solar de nueva generación que estará ubicado en el Observatorio del Roque de los Muchachos, en la isla de La Palma (España). Tras la fase de construcción, cuya duración estimada será de seis años, se espera que la primera luz de EST se alcance en 2030-2031 [6]. Este telescopio, que contará con un espejo primario de 4,2 metros, estará optimizado para estudiar el acoplamiento magnético de la atmósfera solar [7]. Uno de los aspectos clave para el telescopio será el diseño de la óptica adaptativa, lo que redundará en una mejora de la resolución espacial y temporal. Para ello, EST incluirá un complejo sistema de óptica adaptativa multiconjugada (MCAO) que permitirá alcanzar la máxima resolución espacial teórica en un campo de visión circular de 60 arcosegundos.

1.2. Motivación

El campo de la óptica adaptativa presenta una singularidad notable desde la perspectiva de la ingeniería de control. En este ámbito, el objetivo principal del problema de control se centra en el rechazo en tiempo real de las aberraciones introducidas por la perturbación atmosférica en las imágenes captadas. Estas perturbaciones presentan un comportamiento estocástico, lo que complica su modelado y predicción. En la actualidad, el Telescopio Solar Europeo y el Instituto de Astrofísica de Canarias trabajan en la propuesta y validación del sistema de óptica adaptativa que se instalará en EST. Para conseguir la máxima resolución espacial de manera homogénea en imágenes de campo extenso, como son las imágenes solares, es crucial un sistema MCAO. Este esquema de óptica adaptativa presenta múltiples retos tecnológicos debido a la utilización de diferentes sensores de frente de onda y espejos deformables, los cuales deben llevar un control en tiempo real. Para llegar a la propuesta de MCAO más adecuada para cumplir con los requisitos científicos de EST, se ha definido una hoja de ruta en la que se han identificado distintas etapas previas e hitos. Este plan incluye la validación de distintas configuraciones de óptica adaptativa previa a la propuesta de MCAO, incluyendo Single Conjugate Adaptive Optics (SCAO) o Ground Layer Adaptive Optics (GLAO).

Para abordar estos desafíos, dentro del proyecto EST, se están empleando distintas herramientas. En primer lugar, se valida cada una de las configuraciones en simulación. Para ello, se está empleando el simulador de óptica adaptativa DASP. El siguiente paso consiste en la validación de la estrategia de control en un banco óptico experimental a escala del diseño óptico de EST [8]. Este banco está equipado con todos los componentes que forman parte del lazo de control de óptica adaptativa. Estos recursos posibilitan la investigación y evaluación de nuevas soluciones contempladas para el proyecto en un entorno controlado.

En estos momentos se ha validado en simulación y en el banco demostrador la configuración de SCAO. Además, se está trabajando en el proceso de validación de un esquema GLAO. Para el control de estos sistemas se ha empleado un controlador clásico tipo leaky-integrator, cuya utilización está ampliamente extendida en los sistemas de óptica adaptativa. Esta elección es una variante de un controlador proporcional-integral (PI), cuyo término integral incorpora un factor de olvido que minimiza la integración pasada para otorgar robustez frente a errores de medición. No obstante, esta opción tiene una serie de limitaciones que afectan directamente a las correcciones de lazo de control a bajas frecuencias, y cuyo impacto afecta directamente al rendimiento de la estrategia. A tenor de lo anterior, surge la necesidad de explorar la utilización de otro tipo de controlador que permita superar esta limitación. Como primera opción, se ha propuesto el análisis y evaluación de un controlador tipo PI para valorar las posibles mejoras en el rendimiento de las correcciones del sistema de óptica adaptativa frente al leaky-integrator.

1.3. Objetivos

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Grado se centra, en primer lugar, en analizar el esquema de control actual propuesto por EST para la configuración de Single Conjugate Adaptive Optics. En concreto, se estudiará el impacto del leaky-integrator en la capacidad de corrección del sistema. A partir de este análisis, se analizará, implementará y evaluará la propuesta de un controlador tipo PI en simulación. Esto permitirá caracterizar las potenciales mejoras introducidas en la estrategia de control frente a los resultados alcanzados por el leaky-integrator.

Con el fin de alcanzar este objetivo principal, se han propuesto una serie de objetivos secundarios:

1. Estudio del esquema de control propuesto por EST para SCAO. Este estudio incluirá el análisis de los distintos componentes que forman parte del lazo de control y la caracterización de su impacto en el rendimiento de la corrección.
2. Análisis y simulación del lazo de control de la propuesta original basada en un leaky-integrator mediante el software de simulación DASP.
3. Propuesta y análisis de una estructura de control basado en un controlador PI atendiendo a las características dinámicas del sistema de control.
4. Integración del controlador PI propuesto en el simulador DASP.
5. Simulación de la estrategia de control, análisis y evaluación de los resultados obtenidos. En concreto, se realizará una comparativa entre el rendimiento del lazo de control original y el rendimiento alcanzado por la propuesta desarrollada en este Trabajo Fin de Grado.

1.4. Estructura del documento

El presente documento se estructura en cinco capítulos principales. Tras la introducción realizada en el presente capítulo, en el segundo capítulo se presentarán los principios teóricos que rigen la óptica adaptativa. Además, se describirán los componentes principales que conforman un lazo de control clásico en el ámbito de óptica adaptativa. Dada la relevancia del simulador DASP en este trabajo, en el tercer capítulo se explicarán con detalle las principales características de este simulador y su adaptación al esquema óptico de EST. Una vez descritos los aspectos más teóricos, en el cuarto capítulo se desarrollarán las distintas metodologías empleadas para abordar los objetivos de este estudio. En el quinto capítulo se expondrán los resultados obtenidos mediante el análisis de los dos tipos de controladores evaluados. Finalmente, se extraerán las principales conclusiones derivadas de este Trabajo Fin de Grado, así como las potenciales líneas de investigación futuras a evaluar en este ámbito.

2. Contexto y fundamentos teóricos

2.1. Óptica adaptativa en astrofísica

La observación astronómica se ve desafiada por las perturbaciones atmosféricas, que distorsionan las imágenes capturadas por los telescopios terrestres. Para contrarrestar estos efectos, surge la óptica adaptativa (AO, por sus siglas en inglés), una tecnología clave para la corrección de aberraciones ópticas en tiempo real.

2.1.1. Principios de la óptica adaptativa

La atmósfera terrestre presenta varios desafíos cuando se trata de observar cuerpos celestes. Estos fenómenos afectan a la calidad de las imágenes astronómicas y se pueden atribuir a factores como la refracción atmosférica, la turbulencia atmosférica o la contaminación lumínica. En la Fig. 1 se puede ver, de manera esquemática, la diferencia entre la imagen captada por un telescopio terrestre y un telescopio espacial que actúa en ausencia de atmósfera.

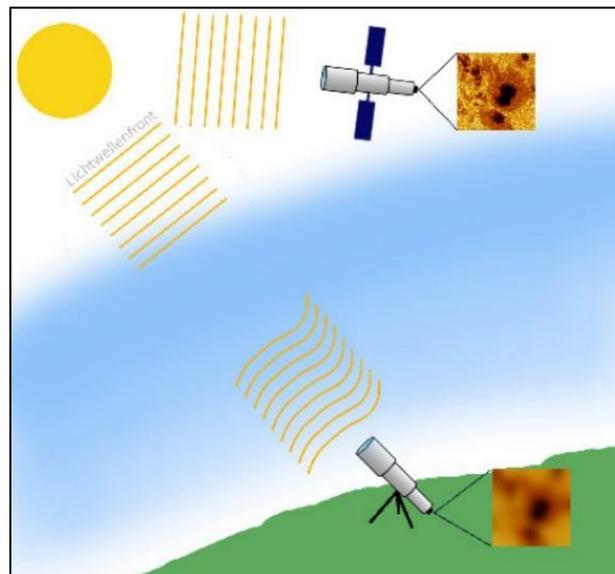


Fig. 1: Comparación de la distorsión que sufre el frente de onda en un telescopio espacial y en un telescopio terrestre [9].

Cuando la luz viaja a través de la atmósfera terrestre se encuentra con variaciones en la densidad del aire debido a las condiciones atmosféricas cambiantes. Estas variaciones causan aberraciones ópticas que distorsionan la luz y afectan a la calidad de las imágenes capturadas por los telescopios, cambiando su intensidad y su forma. Las aberraciones

ópticas se pueden manifestar dándole una forma irregular a los objetos astronómicos (los objetos celestes pueden perder su forma nítida y tener detalles menos definidos) o en forma de destellos (las estrellas pueden aparecer parpadeantes o difusas). Estas distorsiones no solo afectan a las estrellas más alejadas de nuestro planeta, sino a todo tipo de objetos fuera de nuestra atmósfera. Este fenómeno es inevitable, pero puede ser compensado gracias a la óptica adaptativa [9].

La óptica adaptativa es una tecnología utilizada en astronomía y en otros campos que involucran la observación o manipulación de imágenes a través de medios ópticos. En la observación astronómica, su objetivo principal es corregir las distorsiones atmosféricas para obtener una imagen lo más clara posible. Esto se consigue mediante la corrección en tiempo real, usando un espejo deformable (DM, por sus siglas en inglés).

A la hora de corregir las aberraciones ópticas producidas por las perturbaciones atmosféricas se busca situar el espejo deformable en el plano conjugado a dicha perturbación. Entre el telescopio y las diferentes capas de la atmósfera existen distintos tipos de perturbaciones, pero normalmente las turbulencias más fuertes están concentradas en unas pocas capas prominentes. En los sistemas MCAO, por ejemplo, un espejo deformable está dedicado a cada una de las capas más prominentes. Para el caso de observación solar, el esquema GLAO es de los más atractivos, ya que la turbulencia cercana al suelo es especialmente intensa durante el día. Además, tiene un gran potencial al ser capaz de aplicar una corrección uniforme sobre un campo de visión amplio [10].

Para poder corregir las deformaciones del frente de onda con el DM primero se tienen que conocer dichas deformaciones. Para ello se usa un sensor de frente de onda (WFS, por sus siglas en inglés). Un frente de onda se puede ver como la superficie de todos los rayos de luz procedentes de una fuente puntual distante. En este contexto, un WFS se utiliza para caracterizar las distorsiones causadas por la interacción de la luz con la atmósfera. Físicamente, estas distorsiones se producen por un cambio en la fase de la luz, por lo que el WFS mide la fase de la luz en un plano óptico y comanda en tiempo real al espejo deformable para hacer que la luz recorra más o menos distancia, igualando su fase. Idealmente, se busca situar el espejo deformable en el mismo plano óptico que el sensor de frente de onda, para que se actúe en un lugar equivalente a donde se produce la medida.

2.1.2 Esquemas de óptica adaptativa

En función del problema a abordar, existen distintos esquemas para la óptica adaptativa. Cada esquema implica la adaptación de la estrategia de control en función de los elementos intervinientes y el objetivo de control. Entre los más empleados, destacan los siguientes:

- Single-conjugate (SCAO): Este es el esquema de óptica adaptativa más simple que existe y se centra en corregir las aberraciones atmosféricas en una única capa. Consta de un DM y un WFS. La corrección que se puede lograr es efectiva solo para un campo de visión pequeño, de unos pocos arcosegundos.

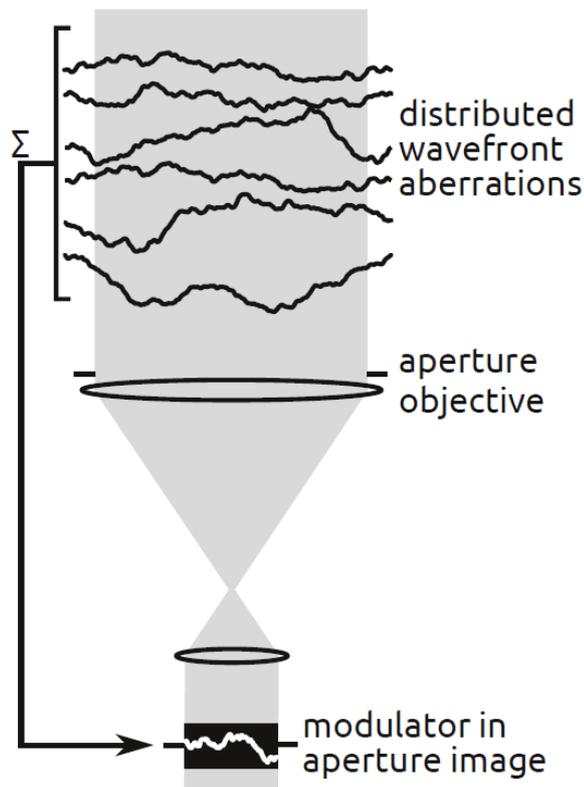


Fig. 2: Esquema de SCAO. Se puede observar el único espejo deformable y las aberraciones del frente de onda distribuidas [9].

- Multi-object (MOAO): El MOAO aborda la corrección de múltiples objetos dentro del mismo campo de visión del telescopio. En este sistema se utiliza un DM para cada objeto. Se puede considerar a este esquema de óptica adaptativa como un conjunto de sistemas SCAO que corrigen las aberraciones para distintas

direcciones del espacio, pudiendo corregir imágenes en un amplio campo de visión. Este esquema no sería adecuado para observación solar, ya que el rendimiento de la corrección no es uniforme en todo el campo de visión.

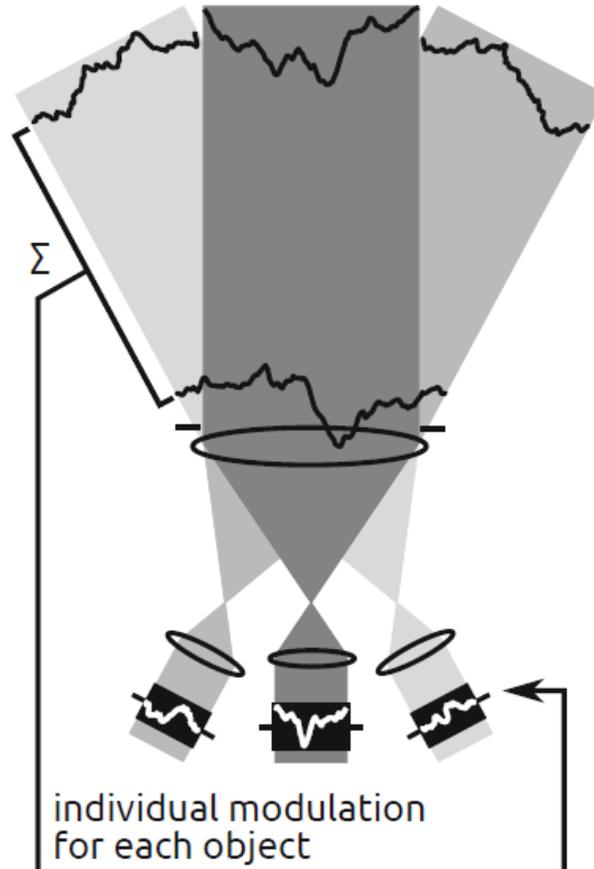


Fig. 3: Esquema de MOAO con un espejo deformable utilizado para cada objeto [9].

- Multi-conjugate (MCAO): Al contrario que el SCAO, el MCAO utiliza múltiples espejos deformables para corregir distorsiones en diferentes capas atmosféricas simultáneamente. Este sistema tiene como objetivo lograr una corrección uniforme en un campo más amplio. Para lograrlo utiliza varios DM, uno para cada una de las capas de la atmósfera más importantes. Como las perturbaciones de las capas atmosféricas menos importantes no se compensan eficazmente, el rendimiento máximo de la corrección será menor en comparación con un sistema SCAO si hay turbulencias significativas en esas capas menos importantes. Sin embargo, para el caso de la observación solar, las capas atmosféricas con mayor perturbación suelen ser las que se encuentran cerca del suelo, por lo que un sistema

MCAO con un DM que trabaje en el plano conjugado cerca del suelo y otro que se ocupe de capas más altas es una buena opción para este tipo de observación.

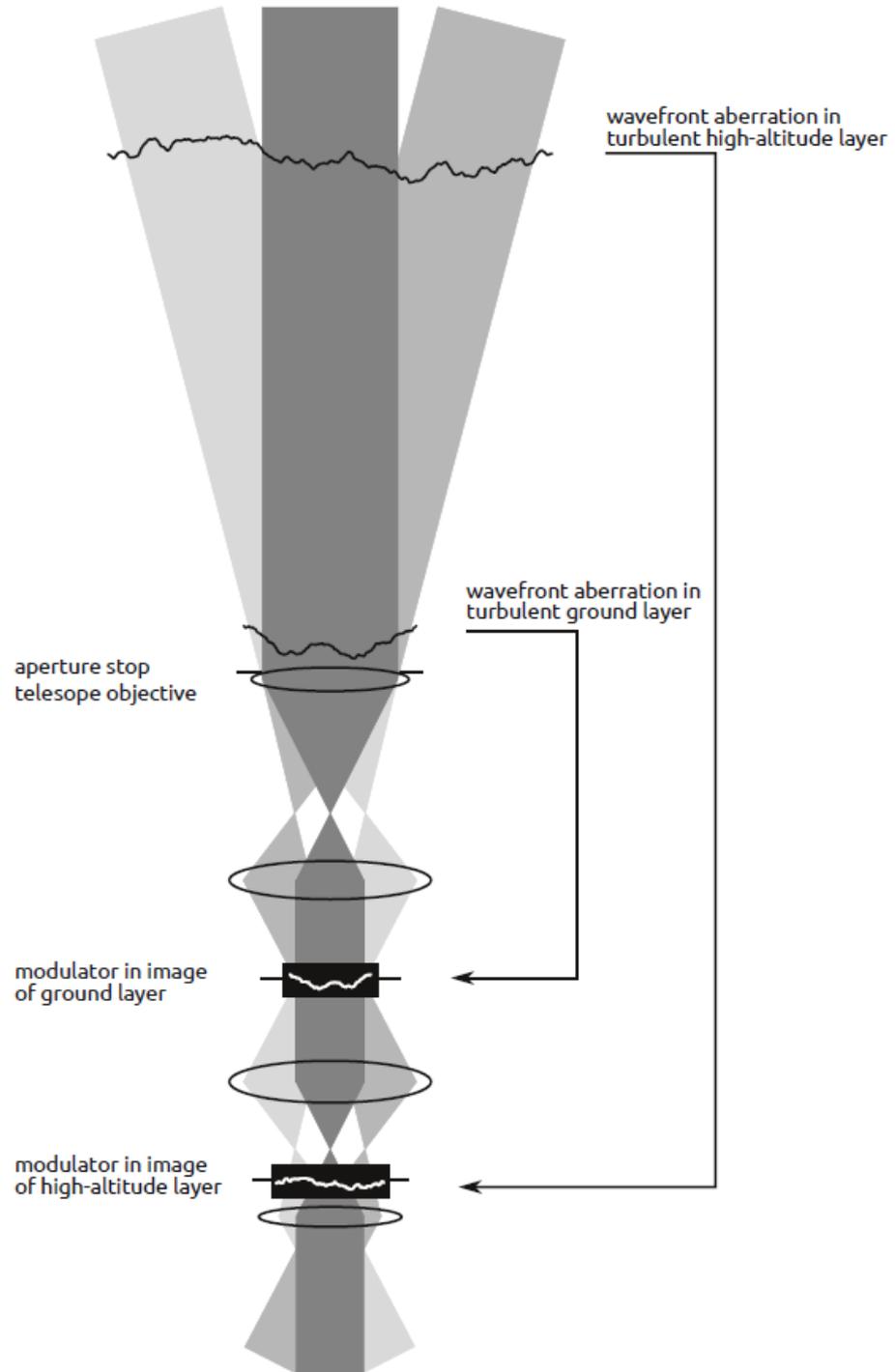


Fig. 4: Esquema de MCAO con dos espejos deformables ubicados en los planos conjugados de una capa cercana al suelo y una capa de gran altitud [9].

- **Ground-layer (GLAO):** Es un tipo especial de SCAO y está diseñado para abordar las aberraciones atmosféricas que afectan a la calidad de las observaciones astronómicas cerca del suelo. Por el mismo razonamiento que se explica en el punto anterior (MCAO), este esquema es una buena opción para observación solar, funcionando como una versión simplificada de MCAO sin DM conjugado a capas de gran altitud.

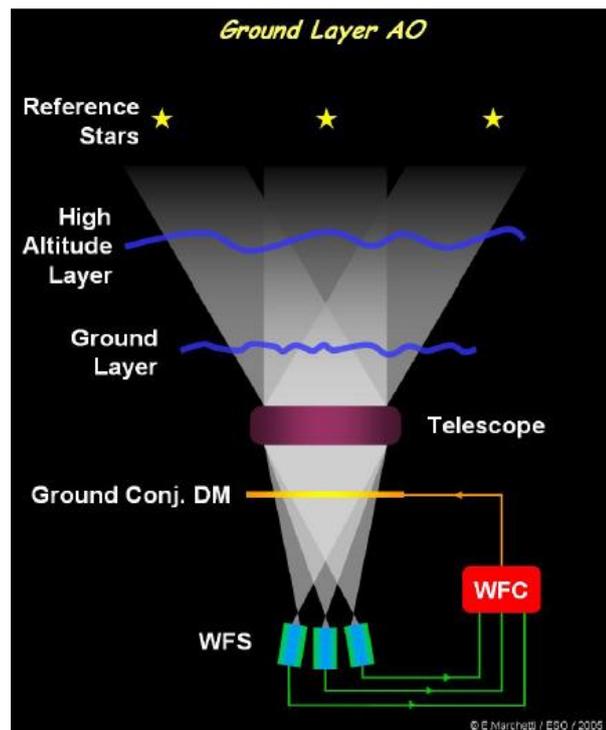


Fig. 5: Esquema de GLAO con un único espejo deformable conjugado en la capa superficial y tres sensores de frente de onda [11].

2.2. Lazo de control para SCAO

En esta sección, se procederá a analizar los diferentes elementos que forman parte de un lazo de control clásico de óptica adaptativa. Atendiendo al objetivo de este Trabajo Fin de Grado, el análisis se centrará en el esquema de óptica adaptativa para SCAO. En términos generales, un lazo de control para SCAO está compuesto por una matriz de reconstrucción (RMX), un controlador, un espejo deformable (actuador) y un sensor de frente de onda (sensor). El esquema de control para un sistema de SCAO se muestra en la Fig. 6.

En un sistema de óptica adaptativa, el espejo deformable es comandado por un controlador en tiempo real en base a las lecturas del sensor de frente de onda. Este sensor, que mide el residuo de la fase tras la corrección con el espejo deformable, introduce un retardo puro en el sistema debido a los tiempos de procesamiento de la imagen. La matriz de reconstrucción permite hacer una conversión entre el espacio de sensado y el espacio de actuación. Este esquema permite contrarrestar las aberraciones ópticas del frente de onda introducidas por la atmósfera, garantizando una corrección precisa y dinámica.

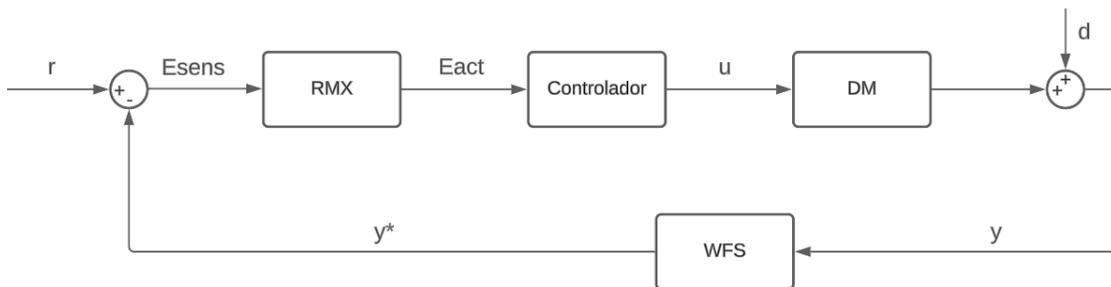


Fig. 6: Diagrama de bloques del lazo de control para SCAO. r : referencia; E_{sens} : error de control medido en el espacio de sensado; E_{act} : error de control medido en el espacio de actuación; u : señal para comandar actuadores; d : frente de onda aberrado (perturbación); y : residuo de frente de onda real tras corrección; y^ : residuo de frente de onda medido tras corrección.*

Por simplicidad, se ha optado por representar el lazo de control como un sistema SISO (single input, single output). No obstante, y como se verá en los siguientes apartados, el espejo deformable está conformado por múltiples actuadores. De forma análoga, el sensor de frente de onda realiza un muestreo espacial del residuo de corrección en pupila que da como resultado múltiples señales de realimentación. Por tanto, se trata de un sistema MIMO (multiple-input, multiple output) en el que las interacciones actuador-sensor juegan un papel relevante desde el punto de vista de control.

2.2.1. Sensor de frente de onda

Un frente de onda representa la superficie formada por los rayos de luz emanados de una fuente puntual lejana. Los sensores de frente de onda (WFS) tienen como finalidad la medición del error que se produce en un frente de onda cuando este pasa a través de conjuntos ópticos que producen algún tipo de aberración o distorsión. En el contexto de

óptica adaptativa en astrofísica, se usan para corregir las distorsiones causadas por el paso de la luz a través de la atmósfera, la cual actúa como un conjunto de lentes. A continuación, se describen algunas de las tecnologías empleadas en este tipo de sensores:

- **Shack-Hartmann:** Consiste en una matriz de microlentes que divide el frente de onda incidente en una serie de subimágenes, y en un detector de imagen, que captura las imágenes individuales generadas por cada microlente. Mediante el análisis de la posición de los puntos de luz en el detector en comparación con sus posiciones ideales, este sensor calcula los desplazamientos locales de la onda incidente, dando el error del frente de onda.

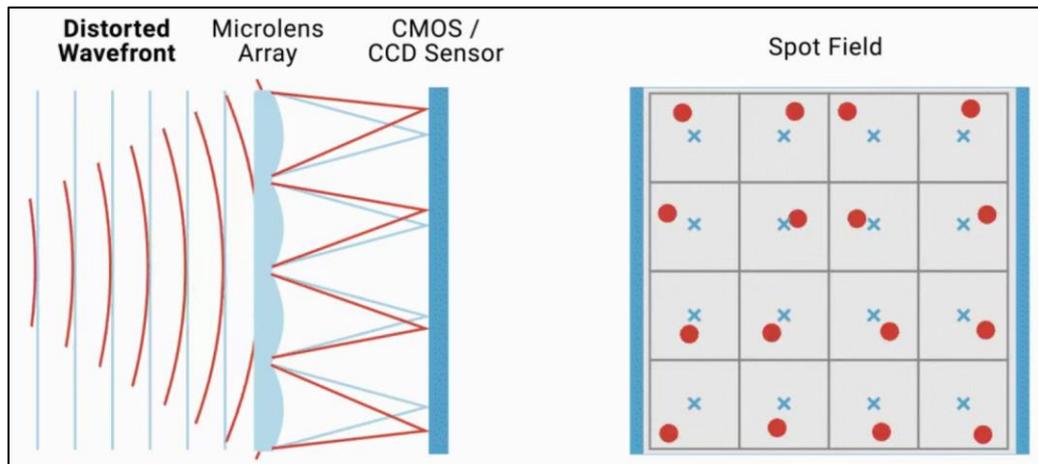


Fig. 7: Principio de funcionamiento de un sensor de frente de onda

Shack-Hartmann [12].

- **LSI:** El LSI, por sus siglas en inglés (Lateral shearing interferometry), se basa en una rejilla de difracción que duplica el haz incidente en cuatro ondas idénticas. Tras unos pocos milímetros de propagación, los cuatro duplicados se superponen e interfieren, creando un interferograma en el detector de imagen [12].
- **Tipo pirámide:** Este sensor utiliza un prisma piramidal para dividir el haz en múltiples partes. En presencia de aberraciones ópticas, la distribución de intensidad entre las pupilas será distinta, permitiendo evaluar las aberraciones del frente de onda [13]. Aunque este sensor no es útil para observación solar, es de gran importancia en la óptica adaptativa nocturna.

El diseño actual para el sistema de óptica adaptativa de EST contempla el uso de sensores de frente de onda tipo Shack-Hartmann [8]. Este sensor ofrece una medida del desplazamiento de cada imagen puntual mediante el cálculo de su centroide (x , y) para cada subapertura. Por tanto, se asumirá este tipo de tecnología en el problema de control tratado en este Trabajo Fin de Grado.

2.2.2. Espejo deformable

Los espejos deformables constituyen el elemento de actuación principal en el esquema de óptica adaptativa. Un espejo deformable está compuesto por una superficie reflectante flexible que puede cambiar su forma para compensar las aberraciones introducidas por la atmósfera mediante el uso de actuadores. Para ello, estos actuadores aplican fuerzas o deformaciones controladas a la superficie del espejo. El rango de movimiento que deben ser capaces de cubrir los actuadores del espejo deformable con el fin de corregir las turbulencias atmosféricas es del orden de unos pocos micrómetros. En la Fig. 8 se describe de forma visual cómo se corregiría el frente de onda usando un espejo deformable.

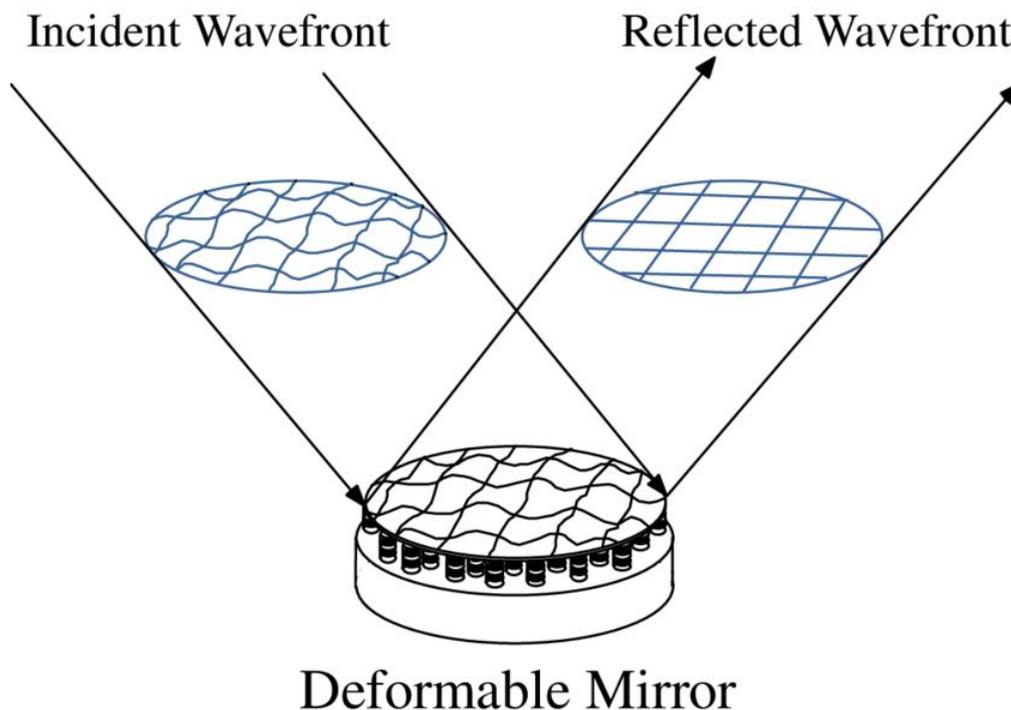


Fig. 8: Corrección del frente de onda usando un espejo deformable [14].

Los actuadores que se usan para un DM se basan en piezoelectricidad, fuerzas electrostáticas (sistemas microelectromecánicos) o fuerzas magnéticas (actuadores de bobina). Entre los distintos tipos de espejos deformables se encuentran los siguientes:

- Espejos con actuadores piezoeléctricos: En este tipo de espejos deformables, los actuadores son barras cerámicas piezoeléctricas que están pegadas a la parte trasera del espejo deformable por un lado y a una base rígida por otro. Esta configuración permite que los actuadores puedan empujar y tirar del espejo deformable al aplicarles voltaje eléctrico, dando el resultado que se puede ver en la Fig. 9 de forma esquemática.

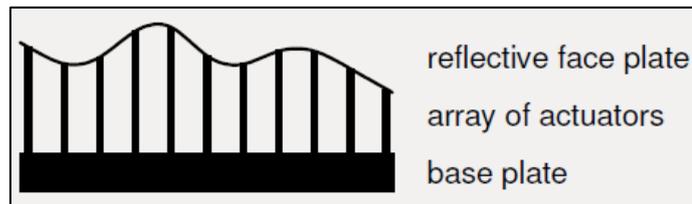


Fig. 9: Sección de un espejo deformable con actuadores piezoeléctricos [9].

- Espejos con actuadores de bobina: La forma de estos espejos es similar a la de los espejos con actuadores piezoeléctricos, con la diferencia de que sus actuadores son una especie de motores eléctricos que utilizan la energía electromagnética para empujar y tirar del espejo deformable. Este desplazamiento se logra con una gran aceleración a la vez que con precisión.
- Espejos bimorfos: Los espejos bimorfos están formados por dos discos de cerámica piezoeléctrica con la misma polarización que están separados únicamente por una fina capa electrodo que forma los actuadores. Una de las superficies que quedan en los extremos de los discos está recubierta por una capa reflectante que hace de espejo. Como la capa electrodo aplica un voltaje opuesto a ambos discos, si un actuador expande el material piezoeléctrico en uno de los discos, el material piezoeléctrico en el otro se contraerá, resultando en una deformación de la capa reflectante.

El banco demostrador de óptica adaptativa de EST cuenta con hasta tres espejos deformables de la marca ALPAO. Estos espejos emplean actuadores piezoeléctricos, con

una distancia entre sus centros de 1.5 mm. El primero de ellos está formado por 820 actuadores distribuidos en 45 mm de diámetro y los otros dos por 468 actuadores distribuidos en 33 mm de diámetro cada uno [8]. Esta configuración permite obtener un esquema óptico a escala para la validación de la estrategia de óptica adaptativa que se implementará en EST. En cuanto a la tecnología y características de los espejos deformables que se emplearán en telescopio actualmente se está trabajando en el diseño preliminar del espejo secundario adaptativo [15]. En los próximos años se definirán las características de los cuatro DMs adicionales que conformarán la estrategia de MCAO para EST.

2.2.3. Controlador

El control de los actuadores del espejo deformable es crucial en los sistemas de óptica adaptativa y, por lo tanto, debe ser extremadamente rápido y preciso, permitiendo la corrección en tiempo real de las perturbaciones atmosféricas. La capacidad de ajustar los espejos en fracciones de segundo es esencial para contrarrestar las fluctuaciones atmosféricas rápidas y mantener la calidad de la imagen. Por otra parte, para asegurar la consistencia en la calidad de las imágenes obtenidas a lo largo del tiempo de observación, es crucial que el sistema de control sea estable y robusto, minimizando cualquier error en la corrección de las aberraciones ópticas. Por estas razones, la elección del controlador, así como su estudio, supone un gran reto a la hora de trabajar con espejos deformables.

En la actualidad hay una gran variedad de telescopios que usan óptica adaptativa, cada uno con su propio sistema. Entre los tipos de controlador que se usan para los distintos sistemas de óptica adaptativa se encuentra el controlador lineal cuadrático gaussiano, más conocido como LQG, por sus siglas en inglés. Este controlador combina un filtro de Kalman con un regulador lineal cuadrático (LQR, por sus siglas en inglés) y es una opción para el sistema de óptica adaptativa de telescopios como el William Herschel, ubicado en La Palma [16].

En el caso del banco EST se está trabajando actualmente con un controlador leaky-integrator, una variante de un controlador PI cuyo término integral incorpora un factor de olvido que minimiza la integración pasada para otorgar robustez frente a errores de medición. Otro ejemplo de proyecto en el que se ha usado este tipo de controlador es en

el observatorio W. M. Keck II, situado en el volcán durmiente Mauna Kea, en Hawaii. Este observatorio consta de dos telescopios (Keck I y Keck II), cuyo controlador estándar es un leaky-integrator [17].

2.2.4. Matriz de reconstrucción

Un elemento indispensable en el lazo de control de óptica adaptativa es la matriz de reconstrucción o RMX. Esta matriz permite convertir la medida de error expresada en centroides (salida del sensor tipo Shack-Hartmann) en una señal de error expresada en términos de actuación (comandos de actuadores del espejo deformable). Esta matriz incluye información sobre las interacciones existentes entre los actuadores del espejo deformable y cada una de las salidas del sensor de frente de onda (desplazamientos de centroides en coordenadas x e y). Además, permite reducir la dimensionalidad del problema (n° de actuadores $<$ n° de centroides), lo que también repercute en los tiempos de cómputo del controlador.

El cálculo de esta matriz precisa, en primer lugar, de la caracterización de las interacciones entre actuadores y los centroides medidos por el sensor. Para ello, debe medirse en primer lugar la matriz de interacción o PMX. El procedimiento más sencillo para la medida de la matriz de interacción consiste en comandar un desplazamiento a cada actuador del espejo deformable de forma individual. De manera simultánea, se registra el efecto que esta actuación tiene sobre la medida del sensor de frente de onda (desplazamientos de centroides, en x e y). Este resultado se almacena en una matriz que relaciona los efectos de cada actuador con cada centroide.

Para obtener la matriz de reconstrucción, se necesita invertir la matriz de interacción. Sin embargo, la matriz PMX no es una matriz cuadrada, por lo que se utiliza una pseudoinversa para hacer el cálculo. Existen varios tipos de pseudoinversa, entre las que la más conocida es la pseudoinversa de Moore-Penrose. Esta matriz es la generalización de la inversa de una matriz para matrices que no son cuadradas o no tienen una inversa tradicional. La matriz RMX indica cómo corregir los datos obtenidos en la PMX, es decir, cómo se deben configurar los actuadores del espejo deformable para corregir las aberraciones atmosféricas teniendo en cuenta su interacción con otros actuadores.

3. Simulador DASP

3.1. Descripción general

DASP (Durham AO Simulation Platform) es una herramienta de modelización Monte-Carlo utilizada para la simulación de sistemas de óptica adaptativa astronómicos y solares. Este software permite a los ingenieros y científicos probar diferentes configuraciones y parámetros del sistema óptico antes de construir físicamente el telescopio, lo que puede llevar a un diseño más eficiente y optimizado, prediciendo el rendimiento del sistema, ahorrando costes y acelerando el desarrollo.

DASP lleva desarrollándose desde principios de los noventa, cuando se creó en la Universidad de Durham, en Reino Unido. Desde la implementación del marco actual en 2006, ha sido diseñado para abordar los desafíos de modelado planteados por los ELT, algunos caracterizados por espejos primarios con diámetros superiores a los 20 metros. A lo largo de los años, el desarrollo continuo de DASP ha estado enfocado en mejorar el rendimiento computacional, aumentar la fidelidad de las simulaciones y expandir la gama de características que pueden ser modeladas con éxito [18]. Este desarrollo ha sido liderado en gran parte por el Dr. Alastair Basden, quien también desarrolló el software DARC (Durham AO Real-time Controller), y ha sido utilizado con éxito en multitud de institutos alrededor del mundo.

DASP se desarrolla principalmente en Python y C, y utiliza pthreads y MPI para la paralelización, lo que permite modelar telescopios de gran tamaño en un tiempo relativamente corto. Además, utiliza un diseño modular que permite añadir nuevos desarrollos y algoritmos manteniendo la compatibilidad. El software es de código libre y está disponible íntegramente a través de la plataforma de GitHub [19].

3.2. Funcionalidades principales

Mediante el uso de DASP es posible obtener una gran cantidad de métricas relevantes para el estudio del rendimiento de la estrategia de óptica adaptativa. Además de la obtención de las matrices PMX y RMX, DASP también implementa la función *daspctrl*, que permite mostrar los resultados a través de una interfaz gráfica. Este simulador permite la sintonización de distintos parámetros clave en la estrategia de control, como el nivel de filtrado de los valores singulares, el tipo de reconstrucción a aplicar, la selección de los

parámetros del controlador o la intensidad y distribución de la perturbación atmosférica. Por otra parte, es posible exportar los datos generados durante la simulación, incluyendo los errores de centroide y cociente de Strehl para el análisis offline de la calidad óptica de la corrección.

La función *daspctrl* permite la visualización de resultados de simulación en tiempo real mediante una pantalla de control. Entre las variables más relevantes que ofrece esta función, destacan las siguientes:

- Evolución de los centroides: La pantalla de control de DASP incluye la representación gráfica de los desplazamientos (en píxeles) de los centroides de cada subapertura. Este desplazamiento representa el error residual a corregir por el lazo de control en cada instante de tiempo. En la Fig. 10 se representa un ejemplo de la información mostrada por DASP.

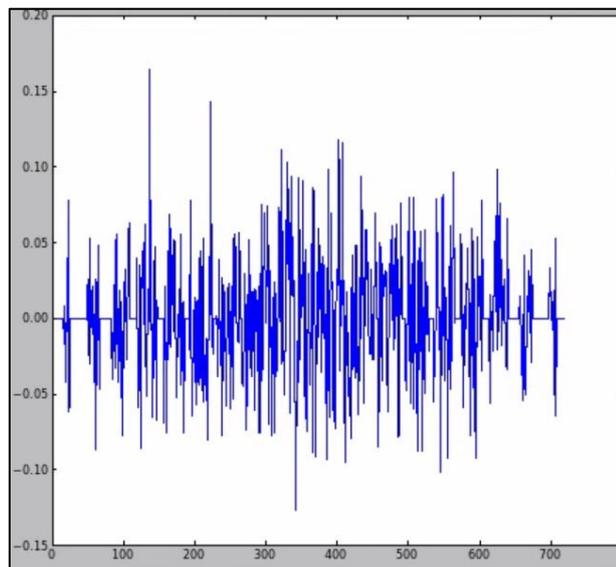


Fig. 10: Desplazamiento de centroides expresado en píxeles.

- Actuación del espejo deformable. Esta funcionalidad representa de forma visual la deformación aplicada al espejo deformable como consecuencia de la señal de control. En la Fig. 11 se representa un ejemplo de esta funcionalidad implementada por DASP.

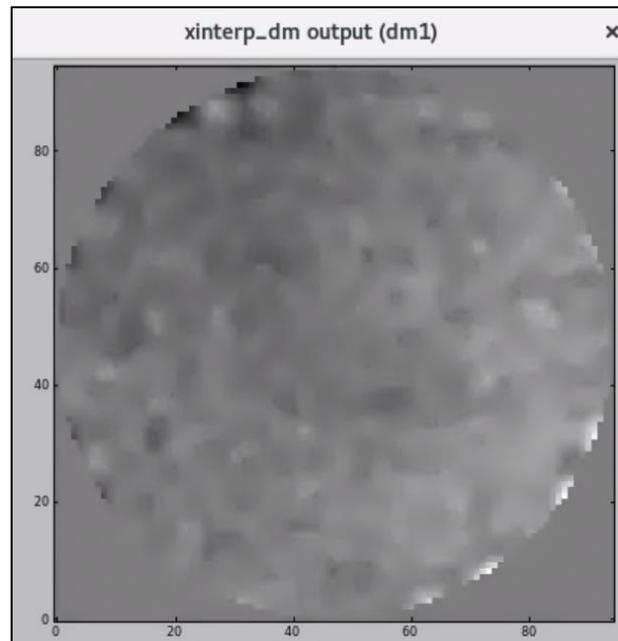


Fig. 11: Actuación del espejo deformable. Los colores blanco y negro representan, respectivamente, el menor y mayor comando de actuación aplicado.

- Valores del Cociente de Strehl: El Cociente de Strehl o Relación Strehl (SR, por sus siglas en inglés) representa una medida de la calidad óptica del sistema. El SR mide la relación entre la intensidad máxima de la función de dispersión de punto (PSF) de la imagen real y de la ideal. Esto da como resultado un valor que oscila entre 0 y 1. Cuanto más próximo sea este valor a 1, mejor será la calidad de imagen del sistema. La pantalla de control de DASP proporciona una lista con el SR para cada instante de tiempo simulado.

3.3. Estructura del simulador

El simulador DASP se organiza en una estructura modular, compuesta por 6 clases principales, cada una desempeñando un papel específico en el proceso de simulación [18]:

- **base/** contiene módulos sin componente científico que sirven como enlace para otros módulos.
- **cmod/** contiene código escrito en C con el objetivo de acelerar la simulación.
- **docs/** contiene documentación.
- **gui/** contiene las interfaces gráficas que se usan para crear simulaciones (*daspsetup*) y para el control (*daspctrl*).
- **science/** contiene módulos científicos de simulación. Esta carpeta incluye, entre otras funcionalidades, la implementación del controlador.
- **util/** contiene módulos de utilidades con algoritmos requeridos por la simulación, que también pueden ser utilizados desde un terminal Python por el usuario.

La funcionalidad *daspbuilder* permite configurar el esquema de óptica adaptativa a evaluar en DASP. Esto incluye el esquema óptico (SCAO, GLAO, ...), el número y ubicación de los sensores y espejos deformables, etc. El proceso de creación de una simulación se puede ver de manera gráfica con la herramienta *daspsetup* en la Fig. 12, en la que se muestra un ejemplo de una simulación compleja para el instrumento CANARY AO en la que se utiliza tanto DASP como DARC para el control en tiempo real.

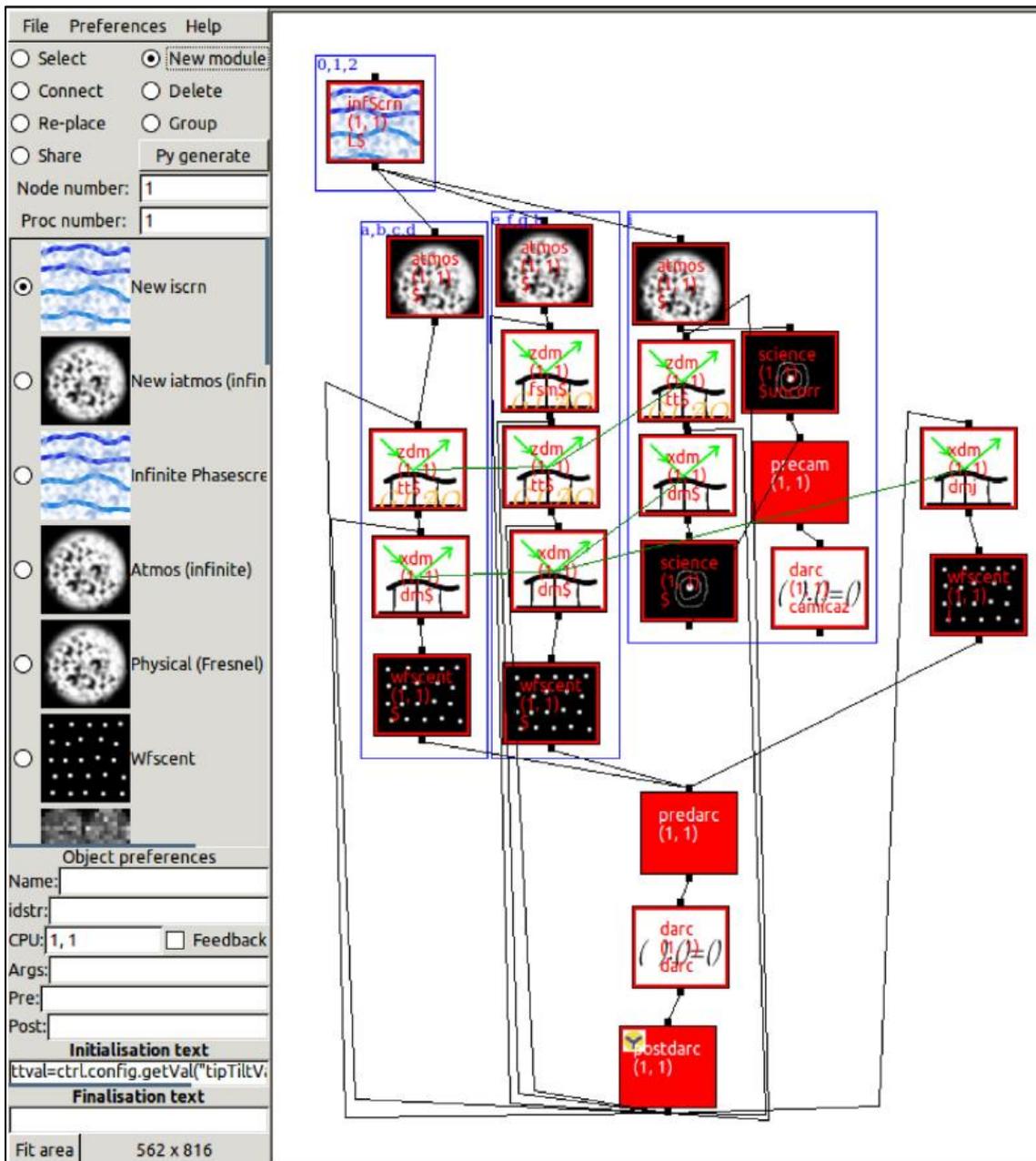


Fig. 12: Instantánea de la herramienta *daspsetup* que muestra la configuración de una simulación utilizada con el instrumento CANARY AO [18].

Una vez configurada la simulación, DASP genera dos archivos con los que se ejecutará dicha simulación:

- Fichero de configuración. Se trata de un fichero Python que ejecuta las simulaciones de acuerdo con la configuración proporcionada. Esto incluye: la inicialización y configuración de los módulos necesarios para la simulación; creación de instancias de los objetos necesarios para la simulación (componentes de atmósfera, correcciones ópticas, etc.); definición del orden de ejecución de los módulos; inicio del bucle principal de control, que ejecuta los módulos en el orden especificado, y finaliza la simulación cuando todos los procesos hayan completado su trabajo. Este archivo implementa el subproceso a partir del cual es posible obtener el histórico de centroides y cocientes de Strehl durante la simulación.
- Fichero de parámetros. Fichero Python en el que se definen los parámetros y datos para la simulación. Este fichero permite modificar parámetros relevantes como el intervalo de tiempo de simulación, el tiempo de muestreo, los datos del telescopio, la caracterización de la atmósfera o los parámetros del controlador.

Cuando se ejecuta una simulación, es posible controlarla en tiempo real con la función *daspctrl*. Esta interfaz gráfica, que se puede ver en la Fig. 13, permite hacer un seguimiento de la simulación en tiempo real e, incluso, realizar algunos cambios online como, por ejemplo, la apertura y cierre del lazo de control.

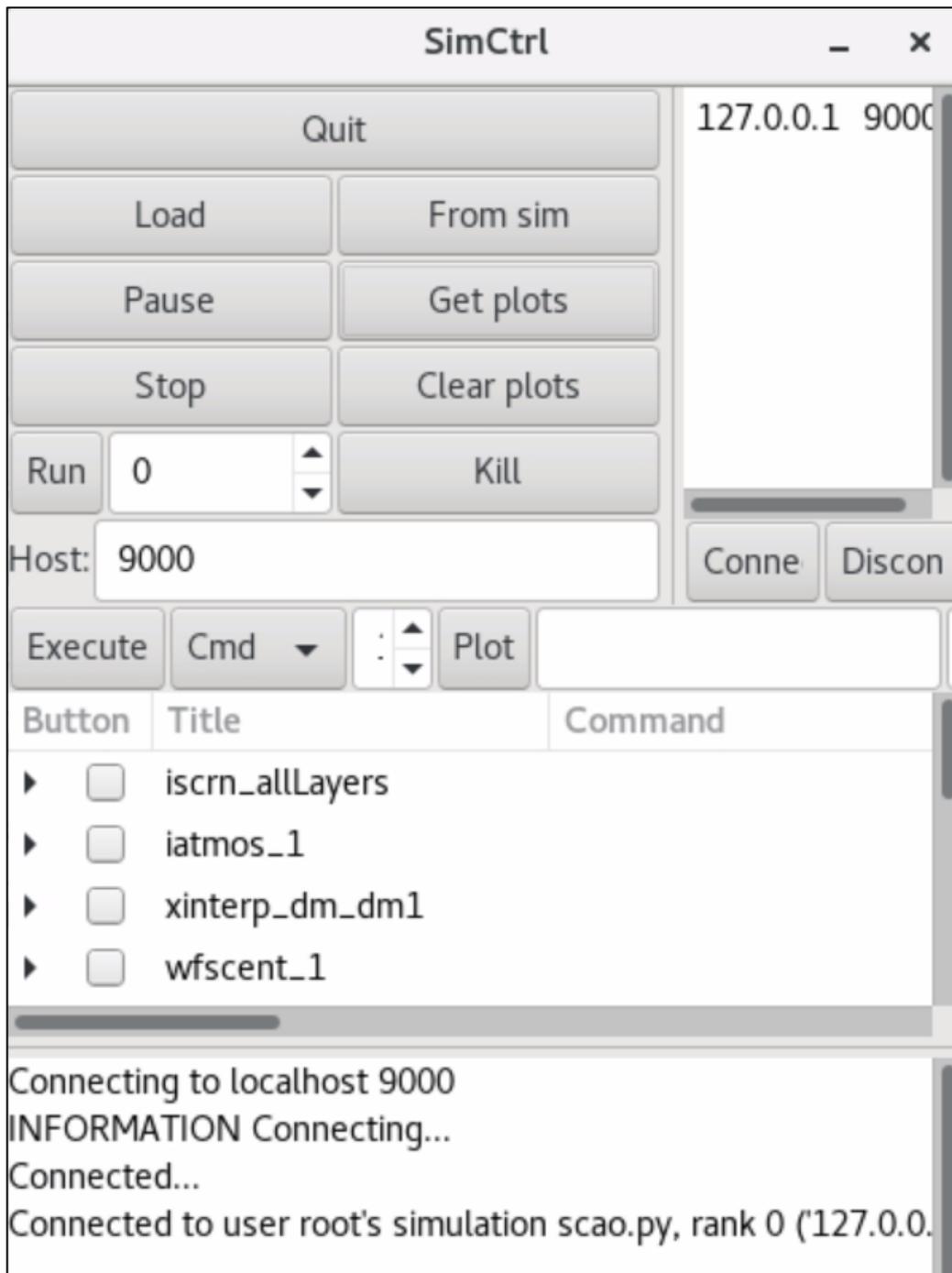


Fig. 13: Interfaz gráfica daspctrl, utilizada para llevar un control y obtener datos de la simulación en tiempo real.

A modo de resumen, en la Fig. 14 se puede ver un diagrama con la estructura del simulador DASP, donde se muestra la función *daspbuilder* que crea una simulación, los módulos de código como *science*, y otras funciones descritas, como la interfaz gráfica (GUI):

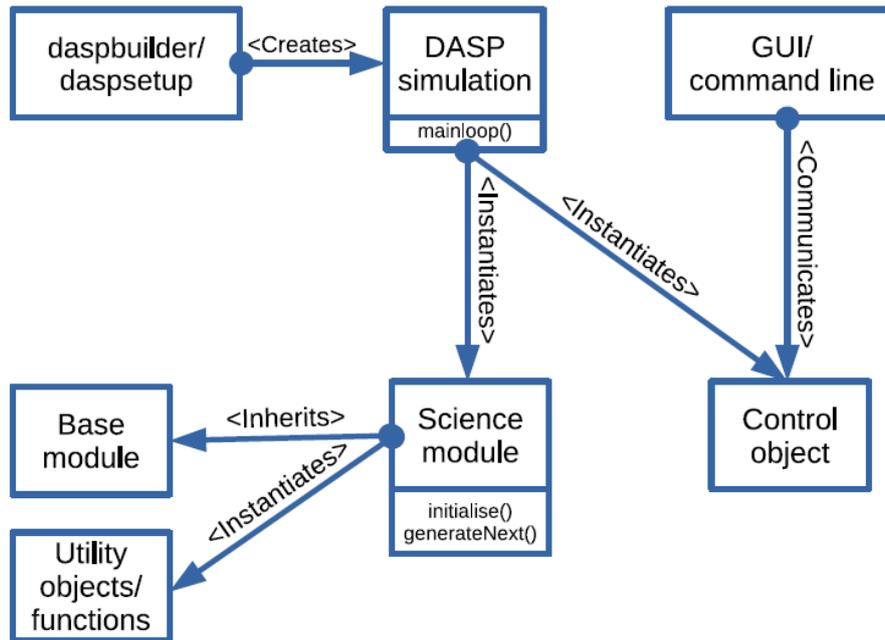


Fig. 14: Visión general de la arquitectura de DASP, que muestra los módulos de simulación y su relación con otros componentes del DASP.

3.4. Clase “recon”

Dada la relevancia de esta clase en el desarrollo de este Trabajo Fin de Grado, se procede a su descripción de forma detallada en este apartado. La clase *recon* se encuentra en el script *tomoRecon.py* de la carpeta *science*. Esta clase implementa los distintos tipos de reconstrucción disponibles en DASP para la obtención de la matriz RMX, incluida la pseudoinversión mediante valores singulares empleada en este trabajo. Además, esta clase implementa el controlador leaky-integrator integrado por defecto en DASP. A partir de esta clase se calcula la señal de control a aplicar a los actuadores de los espejos deformables incluidos en la simulación. En la estructuración original de esta clase se observa que los controladores no se implementan a través de un método propio, sino que se integran en el propio mecanismo de reconstrucción implementado.

3.4.1. Leaky-integrator

El controlador leaky-integrator es el controlador que se usa actualmente para las simulaciones oficiales en DASP. Su señal de control viene dada por la Ecuación 1:

$$a[k] = a[k - 1] \cdot \lambda + Kp \cdot RMX \cdot e[k] \quad (1)$$

donde a representa el comando de actuación, e es el error en dominio de centroides, Kp es la ganancia proporcional, λ es el factor de olvido y k representa el instante temporal evaluado. Este controlador se implementa en dos partes para cada tipo de reconstrucción. En primer lugar, se calcula el término correspondiente al factor de olvido (decay) que caracteriza al leaky-integrator. Para ello, se multiplica la salida del instante pasado (`self.outputData`) por una variable λ (`self.decayFactorOpen`). El código implementado en la clase *recon* para esta finalidad es el siguiente:

```

for i in range(len(self.nactsList)):
    dm=self.dmList[i]
    d=self.outputData[self.nactsCumList[i]:self.nactsCumList[i+1]]
    if dm.closedLoop and (dm.polcMatrix is not None):
        if type(dm.polcMatrix)==type(""):
            print "Loading polc matrix %s"%dm.polcMatrix
            dm.polcMatrix=util.FITS.Read(dm.polcMatrix)[1]
        d[:]=numpy.dot(dm.polcMatrix,d)
    elif type(self.decayFactorOpen)==numpy.ndarray and\
self.decayFactorOpen.size==self.outputData.size:
        d*=self.decayFactorOpen[self.nactsCumList[i]:self.nactsCumList[i+1]]

```

Por otro lado, se suma la parte proporcional, multiplicando la ganancia proporcional Kp (`self.gains`) por el error (`data`) y la matriz RMX (`self.reconmx`):

```

if dorecon:
    if self.multirate==0:
        self.outputData+=(self.gains*quick.dot(self.reconmx,data))

```

Cabe destacar que en el desarrollo de este Trabajo Fin de Grado se ha detectado una discrepancia entre la ecuación teórica del controlador (Ecuación 1) y la implementación

en DASP. En la implementación del controlador en DASP se aplica la resta de las dos componentes del controlador, en vez de la suma que establece la Ecuación 1. Esta resta obedece a un cambio de signo aplicado en una etapa previa en el cálculo del error de control. Esta consideración será clave para evitar errores en la implementación del controlador PI que se propondrá en este trabajo.

3.5. Adaptación de DASP a SCAO para EST

En este apartado se describen las principales características de la configuración de SCAO para EST empleada en este Trabajo. Gracias a su sencillez, este esquema permite estudiar y analizar el control implementado actualmente y proponer nuevas estrategias de control. Al utilizar SCAO, el sistema consta de un único espejo deformable y un sensor de frente de onda. En la Fig. 15 se presenta la estructura del esquema de óptica adaptativa implementado en DASP.

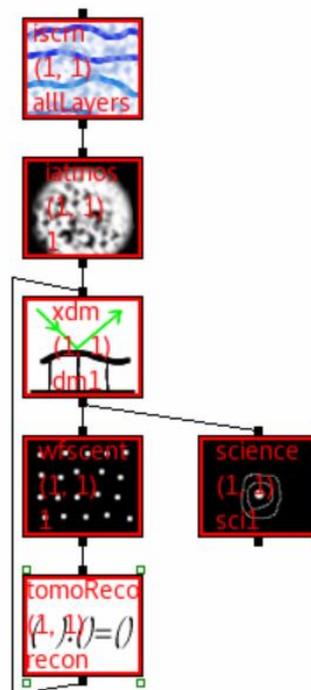


Fig. 15: Esquema SCAO representado con la herramienta daspsetup. Incluye una imagen de prueba, una simulación de las capas de la atmósfera, un DM, un WFS, una cámara de ciencia y el reconstructor con el controlador.

Para la simulación de la atmósfera, se han propuesto dos escenarios diferentes en cuanto a la intensidad de la perturbación atmosférica, caracterizada a través del parámetro de Fried (r_0). Cuanto mayor sea el valor de este parámetro, menor será la intensidad de la perturbación atmosférica. El primer escenario contempla un valor r_0 de 10 cm, mientras que el segundo considera un valor de r_0 de 25 cm. Se ha distribuido la perturbación en cinco capas atmosféricas, asignando a cada una de ellas el siguiente peso relativo 0.65, 0.25, 0.05, 0.03 y 0.02, respectivamente. Las capas atmosféricas están distribuidas a alturas de 0, 1000, 5000, 9000 y 12000 metros. Además, se ha especificado que la velocidad del viento en cada capa atmosférica es, respectivamente, de 5.6, 5.9, 6.25, 7.57 y 19.06 m/s.

En cuanto a los datos del telescopio, se ha definido una configuración óptica basada en las prestaciones ópticas establecidas para EST. Para el WFS, se han configurado 277 subaperturas, con un campo de visión de 10 arcosegundos. El espejo deformable estará conformado por 360 actuadores.

En relación con el reconstructor, se ha seleccionado el método de reconstrucción mediante la pseudoinversión por descomposición de valores singulares. Se ha establecido un valor de filtrado de valores singulares del 2%, lo que influirá en el proceso de reconstrucción eliminando los valores que se encuentren por debajo de este porcentaje.

4. Metodología

4.1. Procesamiento de la matriz de reconstrucción

La obtención de una matriz de reconstrucción (RMX) apropiada es esencial para el control de los actuadores del espejo deformable. Esto depende de un proceso de medida de la matriz de interacción (PMX) en condiciones adecuadas y, además, de un correcto procesamiento de la pseudoinversa. El cálculo de la pseudoinversa a partir de la descomposición de valores singulares permite el filtrado de aquellos valores singulares de menor relevancia. El ajuste de este umbral (*rcond*) supone un equilibrio entre la inclusión de modos relevantes para la reconstrucción y un adecuado filtrado del ruido de medida. Esto tendrá un efecto directo en la calidad final de las imágenes:

- Reducción de información relevante: Al filtrar los valores singulares con menos energía, se elimina información de baja importancia en los datos. En óptica adaptativa, esto puede significar que se están descartando detalles finos o componentes de alta frecuencia en la imagen.
- Disminución del SR: Al eliminar información relevante, el filtrado de valores singulares con menos energía puede llevar a una disminución en la calidad de la imagen, lo que se traducirá en un valor de SR más bajo.

En este apartado se describe el procedimiento seguido en este estudio para la obtención de distintas matrices de reconstrucción y su impacto en el rendimiento de la corrección.

DASP permite simular la generación de una matriz de interacción a partir del sistema SCAO propuesto en este trabajo con 360 actuadores y 554 centroides (coordenadas x e y de las 277 subaperturas). El resultado se muestra en la Fig. 16. En este caso, se almacenan en primer lugar los desplazamientos de los centroides registrados en la componente x de cada subapertura y, a continuación, los desplazamientos en la componente y.

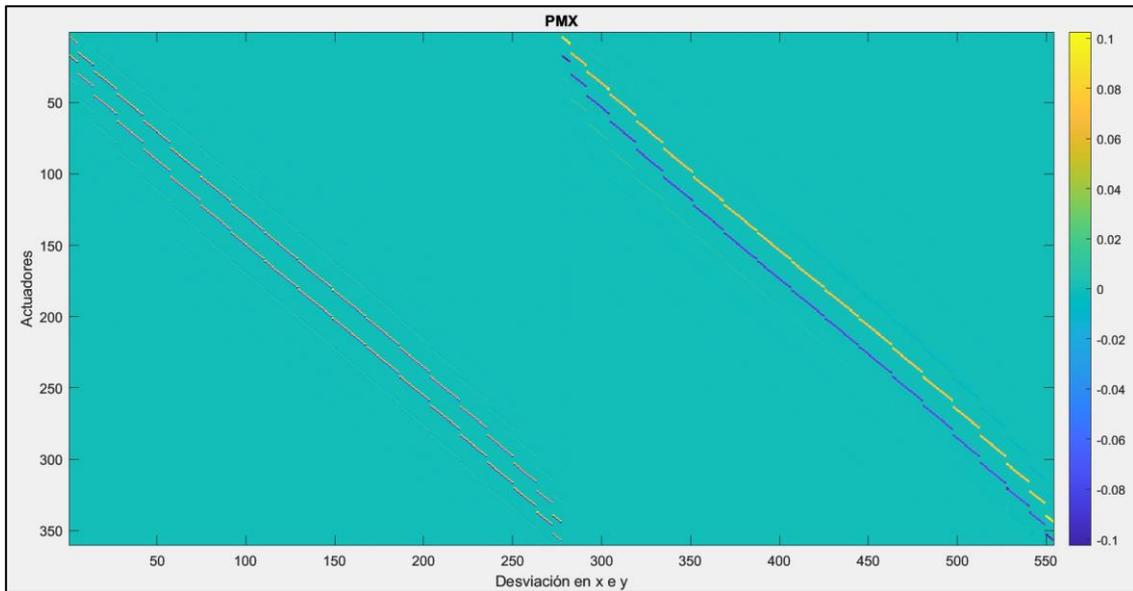


Fig. 16: Matriz PMX. El gradiente de color representa el desplazamiento en pixeles.

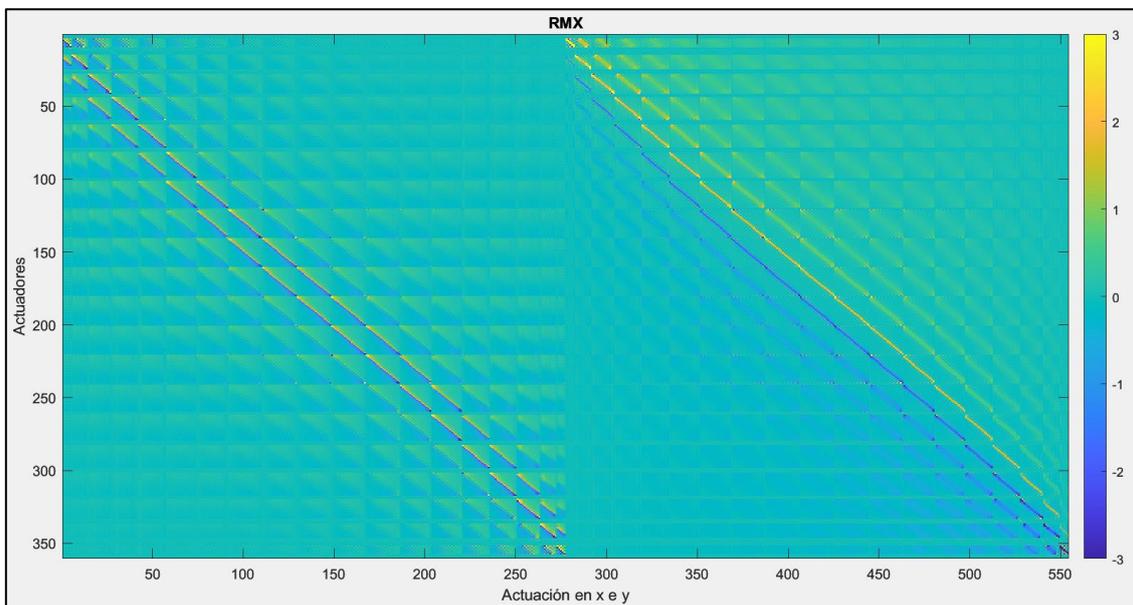


Fig. 17: Matriz RMX. El gradiente de color representa la actuación a aplicar en cada actuador en función de los desplazamientos de los centroides.

Para el cálculo de la matriz RMX, DASP emplea la pseudoinversa de Moore-Penrose (función *pinv* en Python). Un ejemplo de la matriz RMX calculada por DASP se muestra en la Fig. 17. El ajuste del valor de truncado en la pseudoinversión tiene un impacto directo en la matriz resultante, tal y como se muestra en la Fig. 18. Se observa que a medida que aumenta el valor de filtrado de valores singulares, se pierde información centroide-actuador. Mientras que la primera matriz representada ($rcond = 0.01$), tiene una alta componente de ruido, se observa cómo este ruido se atenúa hasta llegar a perder parte de la información.

Con el fin de determinar un valor adecuado del parámetro $rcond$, se ejecutarán distintas simulaciones en DASP en las que se analizarán los efectos de la matriz de reconstrucción para distintos valores de filtrado de valores singulares. En concreto, se compararán las distintas RMX obtenidas con valores de $rcond$ 0.01, 0.05, 0.06, 0.07, 0.08, 0.09, 0.1 y 0.3. Para evaluar el impacto, se analizará tanto el SR de corrección alcanzado como el error de control en el espacio de centroides.

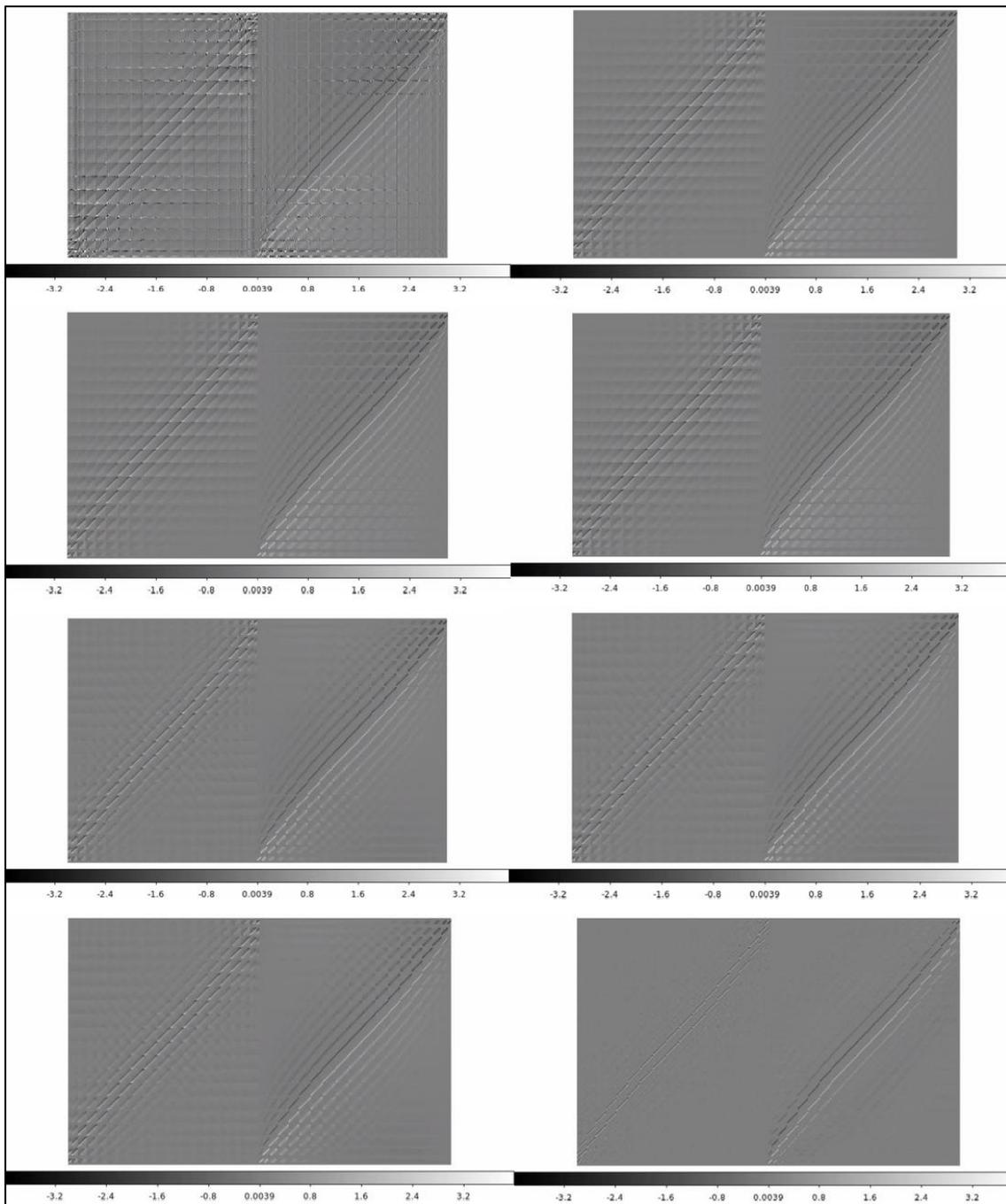


Fig. 18: Matrices RMX para distintos valores de $rcond$. Los valores de $rcond$ correspondientes a cada matriz son, de izquierda a derecha y de arriba abajo, los siguientes: 0.01, 0.05, 0.06, 0.07, 0.08, 0.09, 0.1, 0.3.

4.2. Análisis y sintonización del leaky-integrator

Un controlador leaky-integrator es un tipo de controlador integral que incorpora una pérdida de información a lo largo del tiempo. La acción integral en un controlador leaky-integrator se implementa mediante la integración del error, pero con una tasa de pérdida asociada. Este controlador, en el dominio Z, viene dado por la Ecuación 2.

$$C(z) = \frac{G \cdot z}{z - \lambda} \quad (2)$$

El factor de olvido o tasa de pérdida viene dado por la variable λ , que toma valores entre el 0 y el 1. La pérdida de información será menor cuanto más cerca de 1 esté, llegando a comportarse de manera similar a un controlador PI con $\lambda = 1$. Esto se puede ver en la Fig. 19, en la que se compara el diagrama de Bode resultante de un controlador PI y un leaky-integrator. Así, se puede ver que el leaky-integrator funciona como un filtro pasa-baja para valores $\lambda < 1$, adquiriendo una respuesta en frecuencia similar al de un controlador PI a medida que la variable λ se acerca a la unidad. Mientras que el controlador PI tiende a ganancias infinitas a frecuencias bajas, el leaky-integrator truncará esa ganancia antes de llegar a $\lambda = 1$.

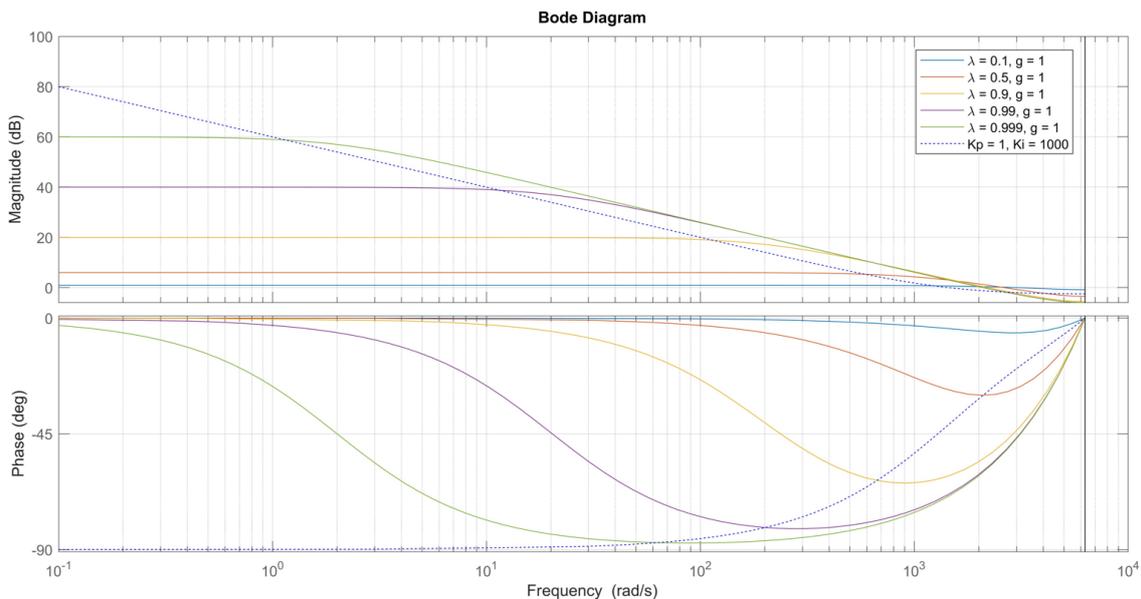


Fig. 19: Diagrama de Bode en el que se compara la respuesta en frecuencia de un controlador PI (línea discontinua azul) con distintos leaky-integrator al variar λ .

Por otro lado, el efecto de la ganancia G en el leaky-integrator se representa en la Fig. 20. Aumentar este parámetro en el controlador leaky-integrator se traduce en un aumento de la ganancia.

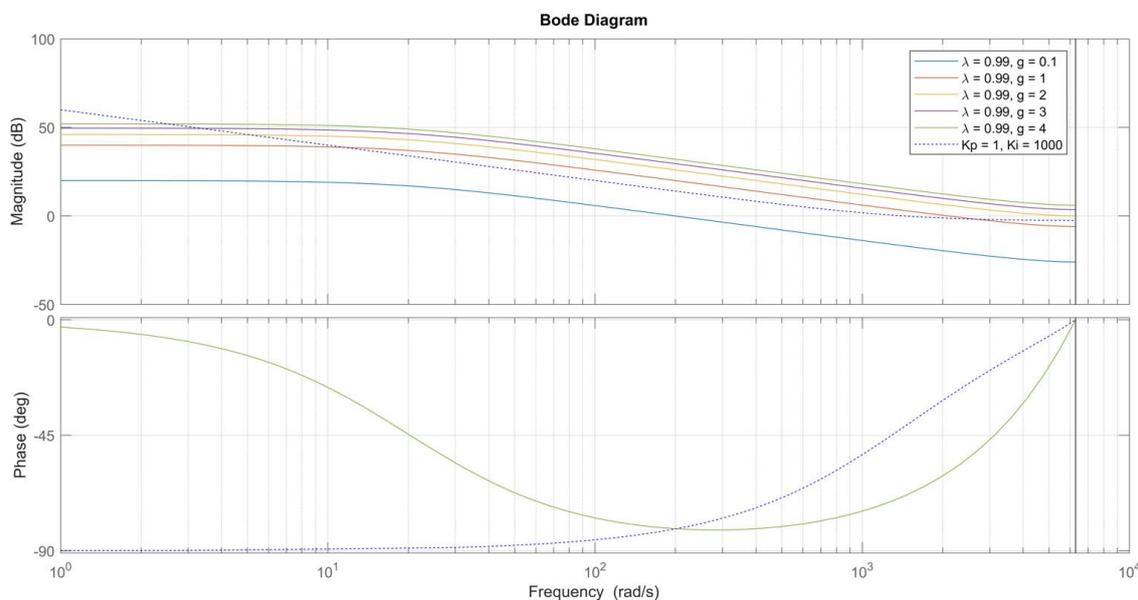


Fig. 20: Diagrama de Bode en el que se compara la respuesta en frecuencia de un controlador PI (línea discontinua azul) con distintos leaky-integrator al variar G .

A partir del análisis anterior, se pretende evaluar el comportamiento del controlador para determinar una sintonización de parámetros adecuada. Primero, se analizará de forma teórica el efecto de la sintonización en la función de sensibilidad del sistema en lazo cerrado (capacidad de rechazo de perturbaciones). Posteriormente, se obtendrá el rendimiento a partir de la simulación en DASP mediante el cálculo del Strehl y el error de control en el espacio de centroides.

4.3. Análisis y propuesta de un controlador PI

El nombre del controlador PI proviene de las dos acciones básicas que implementa: Proporcional (P) e Integral (I). La acción proporcional está relacionada con el error presente en el sistema. Esta componente responde de manera proporcional al valor actual del error. Cuanto mayor sea el error, mayor será la salida del componente proporcional. La acción integral tiene en cuenta la acumulación de errores pasados. Su objetivo es reducir el error acumulado a cero, integrando el error a lo largo del tiempo y produciendo

una salida proporcional a la suma total de los errores. Así, un controlador PI en el dominio Z puede expresarse según la Ecuación 3 y la Ecuación 3.1.

$$C(z) = \frac{Kp \cdot z + p1}{z - 1} \quad (3)$$

$$p1 = -Kp \cdot (1 - Ki \cdot Ts) \quad (3.1)$$

donde Kp es la ganancia proporcional, Ki la ganancia integral y Ts el período de muestreo.

La ganancia integral determina la contribución de la parte integral en la acción de control. Como se puede observar en la Fig. 21, el aumento de esta ganancia mueve el cero del controlador hacia ganancias más altas, aumentando así la ganancia del controlador a frecuencias bajas.

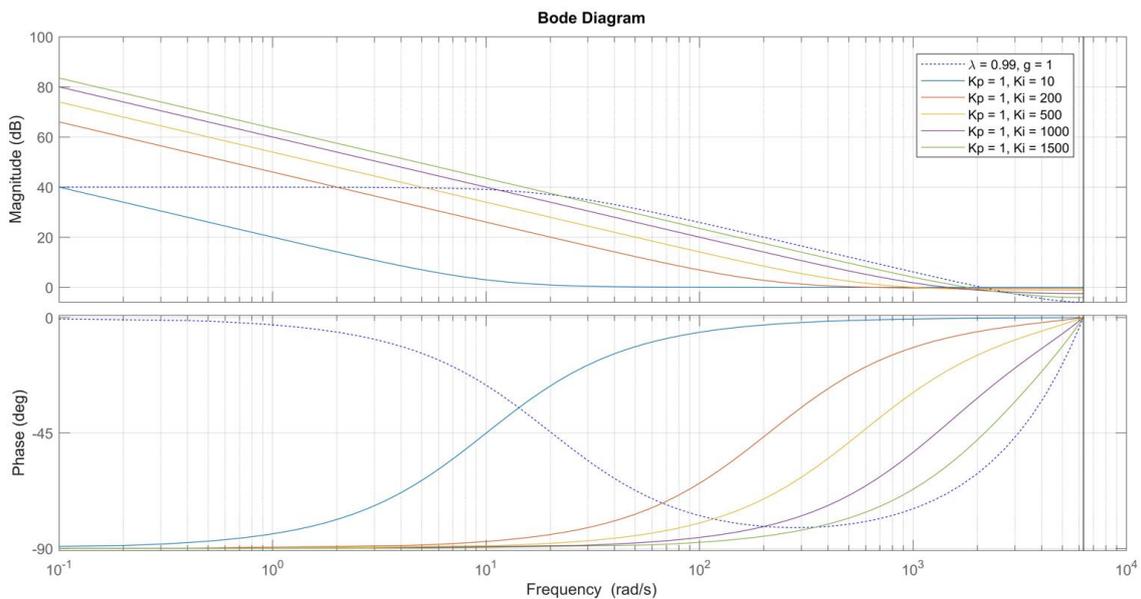


Fig. 21: Diagrama de Bode en el que se compara la respuesta en frecuencia de un controlador leaky-integrator (línea discontinua azul) con distintos controladores PI al variar Ki .

Por otra parte, el efecto del aumento en la ganancia proporcional del controlador PI, el cual se puede observar en la Fig. 22, es muy similar al aumento de la ganancia del controlador leaky-integrator. Al aumentar la ganancia proporcional aumenta la ganancia del controlador en todas las frecuencias.

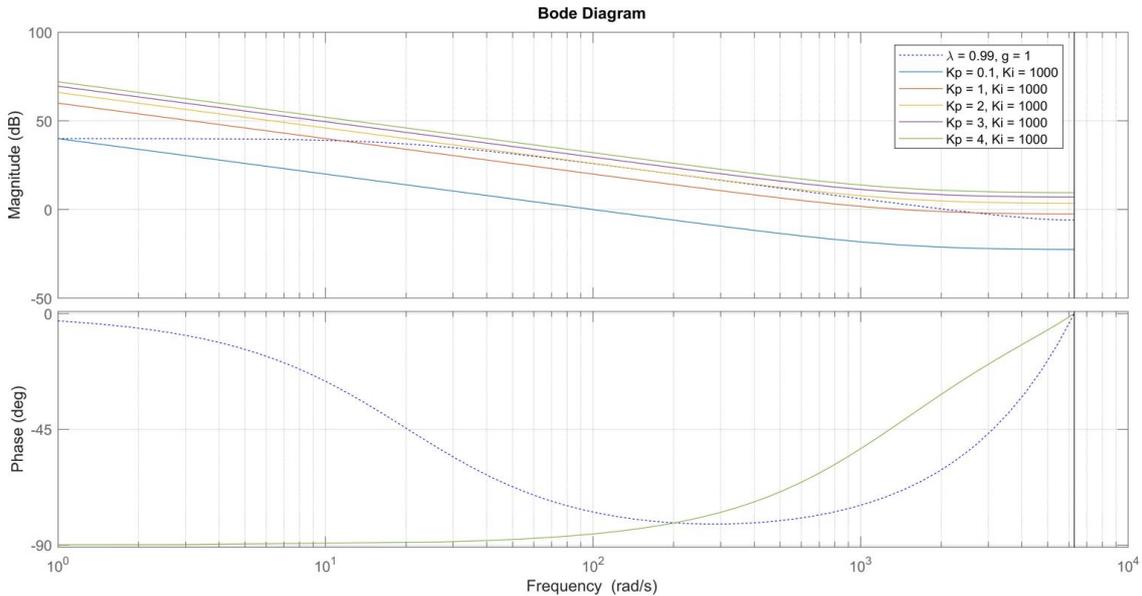


Fig. 22: Diagrama de Bode en el que se compara la respuesta en frecuencia de un controlador leaky-integrator (línea discontinua azul) con distintos controladores PI al variar K_p .

La función de un controlador PI es ajustar la señal de control en función del error actual y la suma acumulada de los errores pasados. En teoría, esto permite que el sistema responda no solo al error actual, sino también a las tendencias históricas del error, lo que puede mejorar la estabilidad y la precisión del sistema, asegurando el control de este.

Al incluir la acción integral se introduce un polo en el origen que hace que el controlador alcance ganancias más altas que el leaky-integrator a frecuencias bajas, lo que tiene un impacto directo para asegurar el error nulo en el estacionario. Por ello, surge la necesidad de estudiar la propuesta de un controlador PI como alternativa para el leaky-integrator en la simulación de la óptica adaptativa de EST.

Al igual que se propuso para el leaky-integrator, se evaluará el impacto de la sintonización del controlador en el rendimiento de la estrategia de control. En primer lugar, se analizará la capacidad de rechazo del sistema en lazo cerrado a partir de la función de sensibilidad para distintos valores de K_p y T_i . A continuación, se realizarán distintas simulaciones en DASP para los valores de K_p y T_i propuestos, con vista a caracterizar el rendimiento de la estrategia a partir del error de control y el Strehl. Estos resultados se emplearán para realizar la comparativa con el leaky-integrator.

4.4. Implementación del controlador PI en DASP

La versión actual de DASP no incluye un controlador tipo PI. Por tanto, es necesario modificar el código original de la clase *recon* para incluir este nuevo controlador. En este apartado se describe el procedimiento que se ha seguido para implementar la nueva propuesta de control en el simulador de óptica adaptativa DASP.

Para empezar con la implementación del PI en DASP, es necesario convertir la ecuación del controlador PID en dominio de tiempo continuo (Ecuación 4), en una ecuación en diferencias.

$$u(t) = Kp \cdot e(t) + \frac{Kp}{Ti} \int_0^t e(\tau) \cdot d\tau + Kp \cdot Td \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (4)$$

Para convertir la Ecuación 4 en una ecuación en diferencias se utiliza el método de discretización directa. En concreto, se considerará la diferencia hacia atrás o backward Euler, cuyas equivalencias se representan en las Ecuaciones 5 y 6:

$$\frac{dy}{dt} = \frac{y(k) - y(k-1)}{T} \quad (5)$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} = \frac{y(k) - 2y(k-1) + y(k-2)}{T^2} \quad (6)$$

En las siguientes ecuaciones se observa el proceso de discretización. En la Ecuación 7 se deriva la Ecuación 4 para eliminar la integral, y en la Ecuación 8 se aplica la discretización directa con backward Euler:

$$\frac{du}{dt} = Kp \cdot \frac{de}{dt} + \frac{Kp}{Ti} \cdot e + Kp \cdot Td \cdot \frac{d^2e}{dt^2} \quad (7)$$

$$\frac{u(k) - u(k-1)}{T} = Kp \cdot \frac{e(k) - e(k-1)}{T} + \frac{Kp}{Ti} \cdot e(k-1) + Kp \cdot Td \cdot \frac{e(k) - 2 \cdot e(k-1) + e(k-2)}{T^2} \quad (8)$$

Finalmente, despejando la Ecuación 8, se obtiene la ecuación en diferencias para el PID discreto, representada en la Ecuación 9:

$$u(k) = u(k-1) + p0 \cdot e(k) + p1 \cdot e(k-1) + p2 \cdot e(k-2) \quad (9)$$

$$p0 = Kp \cdot \left(1 + \frac{Td}{T}\right) \quad (9.1)$$

$$p1 = -Kp \cdot \left(1 - \frac{T}{Ti} + \frac{2 \cdot Td}{T}\right) \quad (9.2)$$

$$p2 = Kp \cdot \frac{Td}{T} \quad (9.3)$$

Para la implementación del PI se considera un tiempo derivativo $Td = 0$, por lo que quedaría la Ecuación 10 como ecuación final para implementar el PI en el código de DASP:

$$u(k) = u(k - 1) + Kp \cdot e(k) + (Kp \cdot Ki \cdot Ts - Kp) \cdot e(k - 1) \quad (10)$$

donde $Ki = \frac{1}{Ti}$.

La implementación de este nuevo controlador se lleva a cabo en la misma parte del código en la que está implementado el leaky-integrator, en la clase *recon* del script *tomoRecon.py*, perteneciente a la carpeta *science*.

Al implementar la señal de control en DASP, se aprovechan algunas variables que se usaban en el leaky-integrator, como la ganancia proporcional (*self.gains*), la salida de control del instante pasado (*self.outputData*), la RMX (*self.reconmx*) y el error en el instante actual (*data*). Por otro lado, se crean nuevas variables como la ganancia integral (*Ki*), el período de muestreo (*Ts*) y el error en el instante anterior (*self.errorPasado*), inicializado a 0 en la primera iteración. El código resultante creado en DASP se muestra a continuación:

```
if self.controllerType == "PID":
    p1 = (self.gains*self.Ki*self.Ts)-self.gains #Kp*Ki*Ts - Kp
    self.outputData-=(self.gains*quick.dot(self.reconmx,data))
    self.outputData -= (p1*quick.dot(self.reconmx,self.errorPasado))
    self.errorPasado = data.copy()
```

Cabe destacar que, como se explicó en el Capítulo 3 para el caso del leaky-integrator, el cálculo de la acción de control se implementa con una resta para corregir el cambio de signo introducido por DASP en el error de control.

4.5. Herramientas empleadas para la sintonización y el análisis de resultados

Para abordar la sintonización de los controladores propuestos y analizar los resultados obtenidos, en este trabajo se han empleado distintas herramientas que han permitido contrastar los resultados obtenidos en el simulador DASP con un análisis basado en un enfoque teórico. En concreto, se han empleado tres entornos de simulación en función del objetivo a abordar.

Análisis teórico basado en Matlab

Se ha utilizado un análisis teórico en Matlab como primer paso en la sintonización de los controladores. En concreto, este análisis ha tenido en cuenta tanto la estabilidad del sistema en lazo cerrado como el análisis frecuencial de la curva de rechazo. Además de la dinámica del propio controlador, se ha incluido una componente de retardo para representar la dinámica del sensor de frente de onda.

Análisis teórico basado en modelo Simulink

Para profundizar en los resultados teóricos iniciales, se han desarrollado distintos modelos en el entorno Simulink. Estos modelos han permitido evaluar el comportamiento temporal del sistema de control incorporando dos componentes fundamentales:

1. Matriz RMX medida de DASP, pudiendo analizar el efecto de la matriz de reconstrucción en el control. Se obtiene, por tanto, un sistema MIMO para el que se aplica el mismo controlador para todos los actuadores.
2. Perturbación atmosférica original obtenida de DASP. Para ello, se ha realizado una simulación en lazo abierto en DASP y se ha registrado la evolución de los centroides (x,y) para todas las subaperturas. Esta información es aplicada como entrada de perturbación al modelo Simulink.

Análisis basado en DASP

La simulación en DASP es el escenario más cercano a la realidad disponible. Con este simulador se obtienen los cocientes de Strehl y los desplazamientos de centroides (errores de control) para cada instante de tiempo de la simulación. Estos datos son procesados en

Python y Matlab para extraer información como las curvas de rechazo para la comparación de los controladores.

4.6. Métricas para la caracterización del rendimiento de la estrategia de control

Para analizar los resultados obtenidos y llevar a cabo la comparación entre las dos estrategias de control se ha propuesto el uso de distintas métricas.

Métricas para la caracterización de la calidad óptica

Se han empleado dos métricas principales:

- Error RMS medido en centroides.
- Cociente de Strehl.

En cada instante de tiempo se obtiene un centroide para cada subapertura del sensor de frente de onda. Cada centroide viene dado por unas coordenadas 'x' e 'y', proporcionadas por DASP. El método elegido para analizar los resultados se basa en el cálculo del valor cuadrático medio (RMS) de los centroides de todas las subaperturas para cada instante de tiempo, obteniendo un valor de error RMS para la superficie del sensor de frente de onda. Estos valores RMS dan una medida del rendimiento de la corrección del lazo de control. Para el cálculo del valor cuadrático medio de una superficie del sensor en un determinado instante se utiliza la fórmula representada en la Ecuación 11, siendo x el error expresado en píxeles de cada subapertura:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n}(x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2)} \quad (11)$$

Con el fin de analizar la calidad óptica que es capaz de alcanzar el telescopio simulado, se procesan los cocientes de Strehl obtenidos a partir de DASP. La lista de valores SR que proporciona el simulador aporta otros datos como la anchura a media altura (FWHM, por sus siglas en inglés), por lo que es necesario procesar los datos con Python para obtener una lista únicamente con los valores SR.

Métricas para la caracterización de la corrección del lazo de control

Se analizarán dos características fundamentales:

- La función de sensibilidad del sistema de control en lazo cerrado.
- La densidad espectral de potencia (PSD) de la perturbación resultante.

Debido a la utilidad de la función de sensibilidad para caracterizar el rechazo del bucle de control en el dominio de la frecuencia, así como para medir el rendimiento y la robustez del sistema, se procesa esta curva a partir de datos experimentales obtenidos del simulador una vez procesados (valores RMS). Para analizar la función de sensibilidad en el simulador DASP y compararla con los análisis teóricos anteriores se considera que la salida medida del sistema, y^* , se puede expresar como función de la perturbación d usando la función de sensibilidad como se expresa en la Ecuación 12:

$$y^* = \frac{WFS}{1+OL} \cdot d = S \cdot d \quad (12)$$

siendo OL la función de transferencia del lazo abierto del sistema, y teniendo en cuenta que en este caso se considera y^* como la salida medida por el WFS (modelado como dos muestras de retardo puro).

Por otro lado, para caracterizar la capacidad de corrección en frecuencia se propone el cálculo de la densidad espectral de potencia (PSD, por sus siglas en inglés). Esto permite caracterizar tanto la salida medida (PSD $_y$) como la perturbación (PSD $_d$) atmosférica aplicada [20]. Este método es de gran importancia porque permite visualizar la distribución de los valores RMS del error (obtenidos como ganancias) en el dominio de la frecuencia. A partir de la PSD $_y$ y la PSD $_d$ también es posible caracterizar la curva de rechazo del lazo de control en DASP a partir de la Ecuación 13:

$$|S| = \sqrt{PSD_y \cdot PSD_d^{-1}} \quad (13)$$

Para el cálculo de las PSDs se ha empleado el estimador de promediado de segmentos superpuestos de Welch (*pwelch* en Matlab) con ventanas Hamming. Este método consiste en dividir la señal en segmentos superpuestos, aplicar una ventana de Hamming a cada segmento para reducir el efecto de las discontinuidades en los bordes, calcular la transformada de Fourier de cada segmento, promediar los espectros resultantes y

finalmente estimar la PSD. Esto ayuda a reducir el efecto de la variabilidad en la estimación de la PSD y mejorar su precisión.

5. Resultados

5.1. Análisis del efecto de la matriz de reconstrucción

En este apartado se presentan los resultados obtenidos al evaluar el efecto del truncamiento de los autovalores (parámetro $rcond$) en el rendimiento de la corrección del sistema de control. Para ello, se ejecutaron distintas simulaciones en DASP variando el valor de truncamiento.

En primer lugar, se analizó el rendimiento de la corrección en términos de Strehl. Para procesar los valores obtenidos de las simulaciones se desarrolló un fichero Python. En la Fig. 23 se muestra una gráfica tipo box plot para cada $rcond$ analizado en la que se ha incluido el valor de Strehl instantáneo a lo largo de toda la simulación.

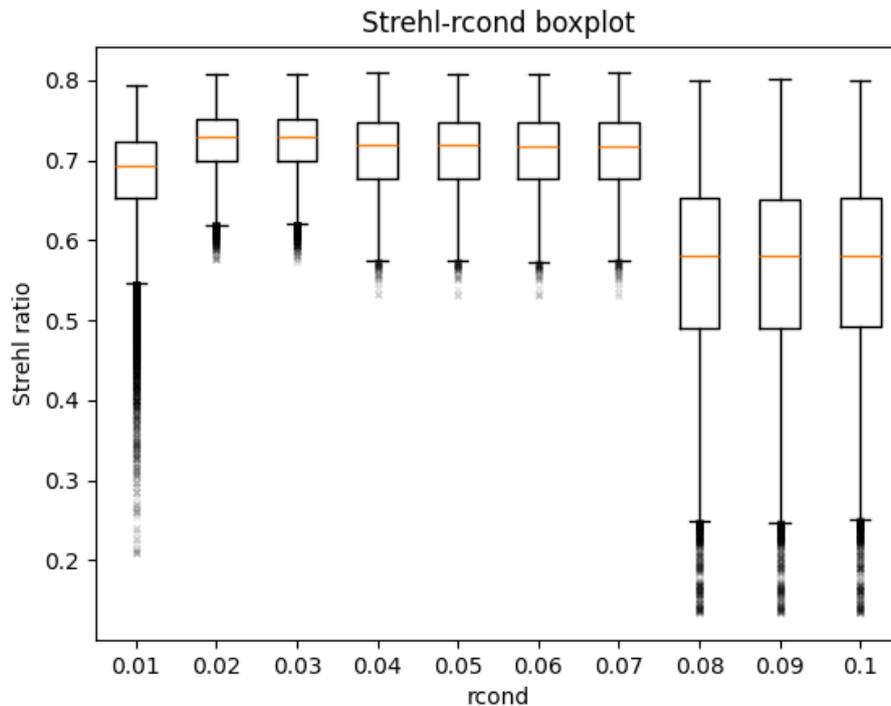


Fig. 23: Box plot de SR frente a $rcond$. Extremo superior del bigote: máximo no atípico; extremo superior de la caja: percentil 75; línea naranja: mediana; extremo inferior de la caja: percentil 25; extremo inferior del bigote: mínimo no atípico; x: valores atípicos.

Al analizar el efecto de los distintos valores de $rcond$ en la matriz RMX se podía ver cómo, al ir aumentando el valor de $rcond$, había un mayor filtrado de la información. Al filtrar esta información se reduce la componente de ruido en la RMX, pero se observa una disminución del SR, indicando que la calidad de la imagen está empeorando. Para valores

de $rcond$ de 0.08 o superiores, el SR empieza a disminuir de forma considerable. A partir de los resultados obtenidos, se puede asegurar que los valores de filtrado de valores singulares más adecuados para el caso de estudio estarían entre 0.02 y 0.03.

Al igual que para los valores de SR, se ha analizado el error de control mediante el análisis del desplazamiento de centroides a lo largo de la simulación. Los datos se procesaron usando un script de Python para calcular los valores de error RMS. En la Fig. 24 se muestra una gráfica tipo box plot para cada $rcond$ analizado en la que se ha incluido el valor de error RMS instantáneo a lo largo de toda la simulación. Al igual que ocurría con el SR, se confirma la selección de los valores de $rcond$ 0.02 y 0.03 como los más adecuados, ya que resultan en los valores de error más bajos.

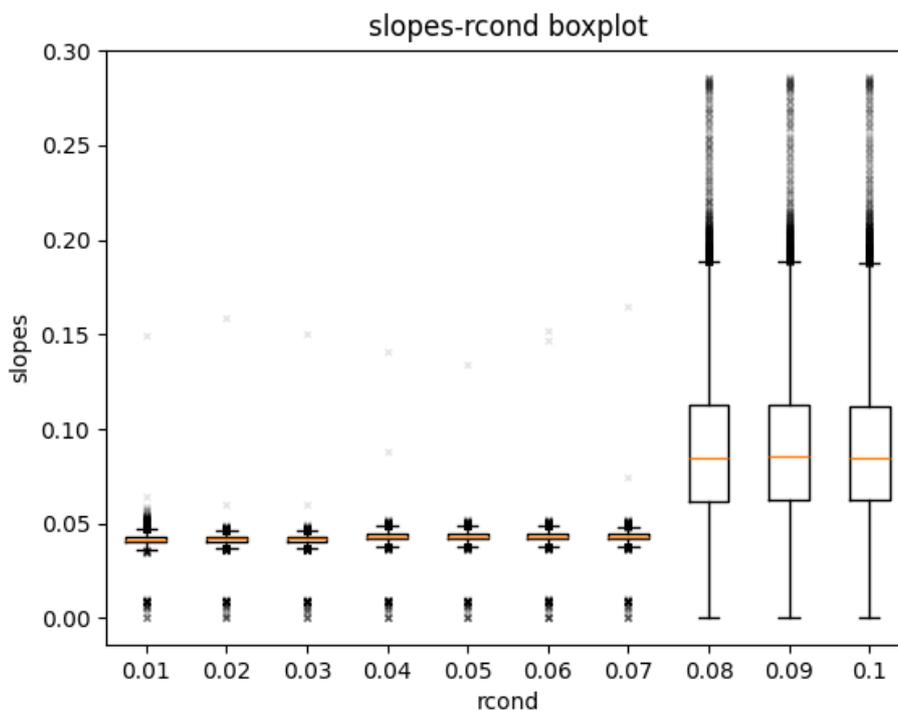


Fig. 24: Box plot de pendientes (escala en píxeles) frente a $rcond$. Extremo superior del bigote: máximo no atípico; extremo superior de la caja: percentil 75; línea naranja: mediana; extremo inferior de la caja: percentil 25; extremo inferior del bigote: mínimo no atípico; x: valores atípicos.

Los desplazamientos de los centroides son una buena medida del error de control obtenido, por lo que otra práctica interesante es visualizar dichos valores frente al tiempo a lo largo de la simulación. Esto aporta información sobre cómo se está corrigiendo el

error o si el sistema se mantiene estable. En la Fig. 25 se representa la evolución del error RMS frente al tiempo con un $rcond$ de 0.02. A lo largo de la simulación se obtiene una desviación de los centroides de alrededor de 0.04 píxeles. Cabe destacar que los valores anómalos al principio de la simulación se deben al proceso de medición de la matriz de interacción realizado por DASP al comienzo de la simulación y al transitorio.

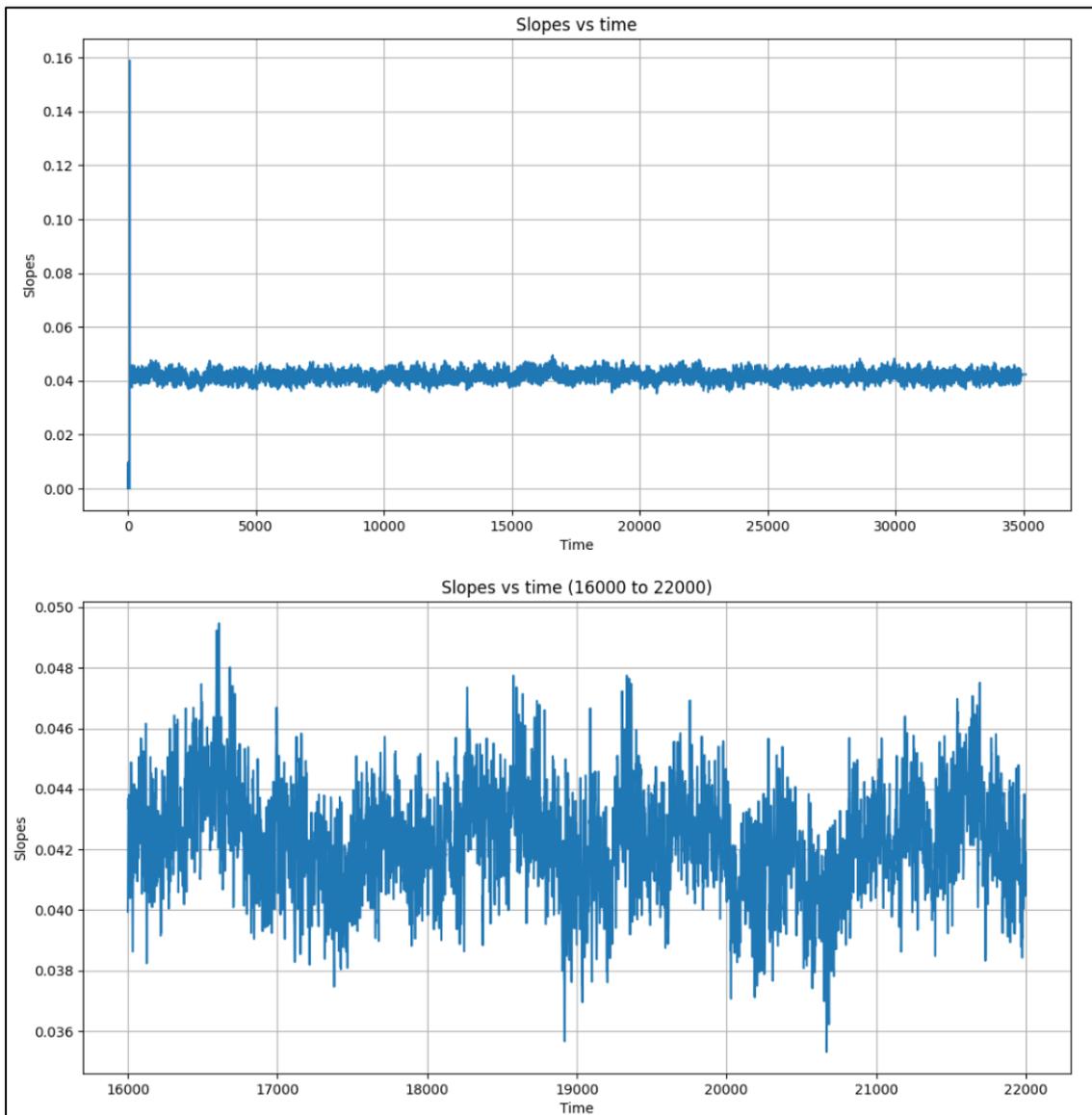


Fig. 25: Valores RMS de las pendientes de los centroides de toda la superficie del sensor (slopes en píxeles) frente al tiempo con un valor de filtrado de valores singulares $rcond=0.02$.

La gráfica inferior corresponde a un zoom de la gráfica superior.

Tras la evaluación de los resultados derivados del análisis de la matriz de reconstrucción, se ha decidido emplear un valor de $rcond$ de 0.02 (2%) para el análisis de los controladores.

5.2. Resultados de la simulación para el controlador leaky-integrator

En este apartado se presentan los resultados del análisis y rendimiento alcanzado con el controlador leaky-integrator. Con el fin de analizar y sintonizar el leaky-integrator, se ha obtenido la función de sensibilidad teórica en el lazo cerrado. Para ello, se ha empleado un script realizado en Matlab para representar el diagrama de Bode que se muestra en la Fig. 26. La función de sensibilidad mide la capacidad del sistema para rechazar una señal a una perturbación, siendo una manera de saber cómo es la corrección del lazo de control a lo largo del rango de frecuencias.

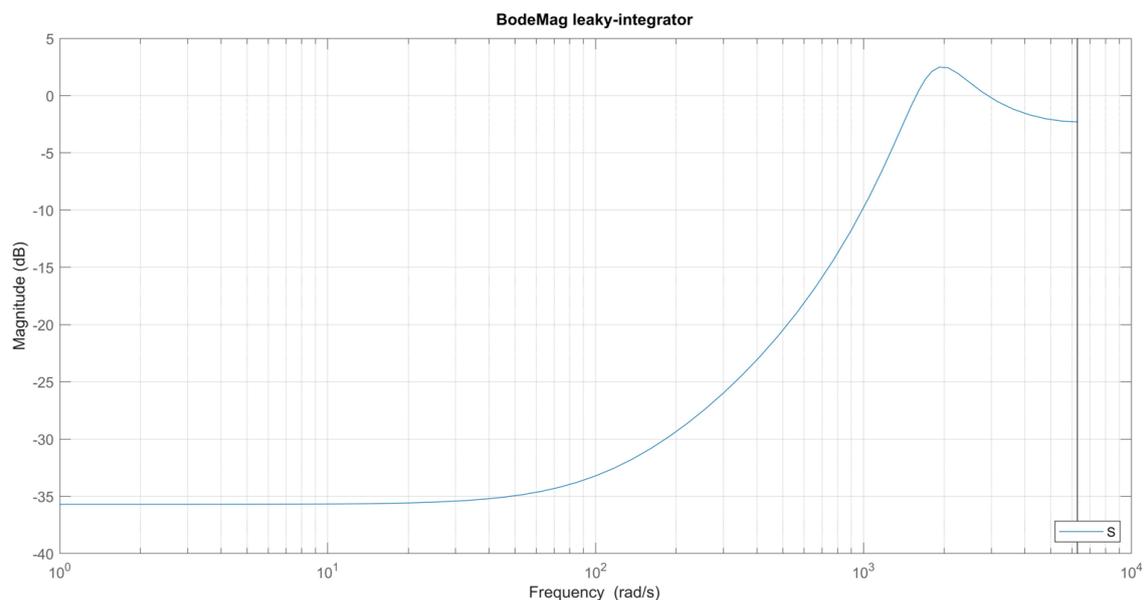


Fig. 26: Función de sensibilidad para el leaky-integrator con variables $G=0.6$ y $\lambda=0.99$.

Al estudiar la función de sensibilidad del controlador leaky-integrator se puede observar que a bajas frecuencias existe una limitación en la capacidad de atenuación a causa de la variable λ . Cuanto más cerca de 1 se encuentra λ , mayor será el nivel de atenuación del leaky-integrator a bajas frecuencias.

Para llevar a cabo la sintonización del controlador, primero se buscan de forma teórica valores razonables para G y λ . En una segunda etapa, se introducirán estos valores en DASP para verificar si las simulaciones son coherentes con los resultados teóricos. Para fijar un valor de ganancia G , se proponen distintos valores para un λ fijo. Se establece como condición que el pico de ganancia de la curva de rechazo no supere los 6 dB. En la Fig. 27 se presentan las curvas de rechazo obtenidas para diferentes valores de G .

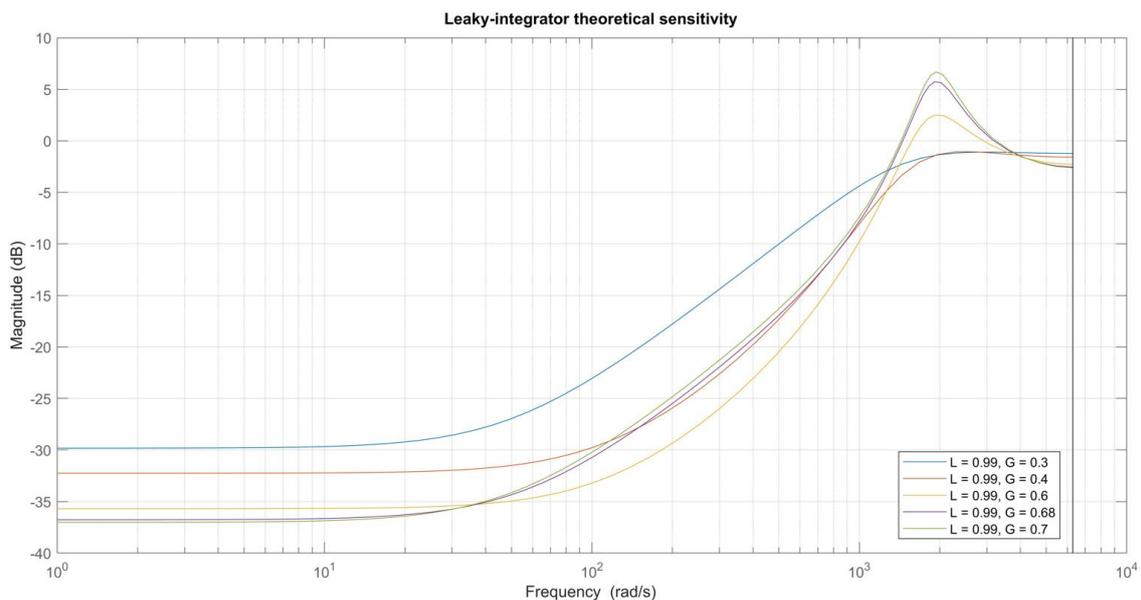


Fig. 27: Representación de distintas curvas de rechazo teóricas para distintos valores de G al fijar $\lambda=0.99$.

En base a los criterios propuestos, se selecciona un valor de $G = 0.68$. Para este valor, se analiza el efecto de λ . Las curvas de rechazo resultantes se muestran en la Fig. 28.

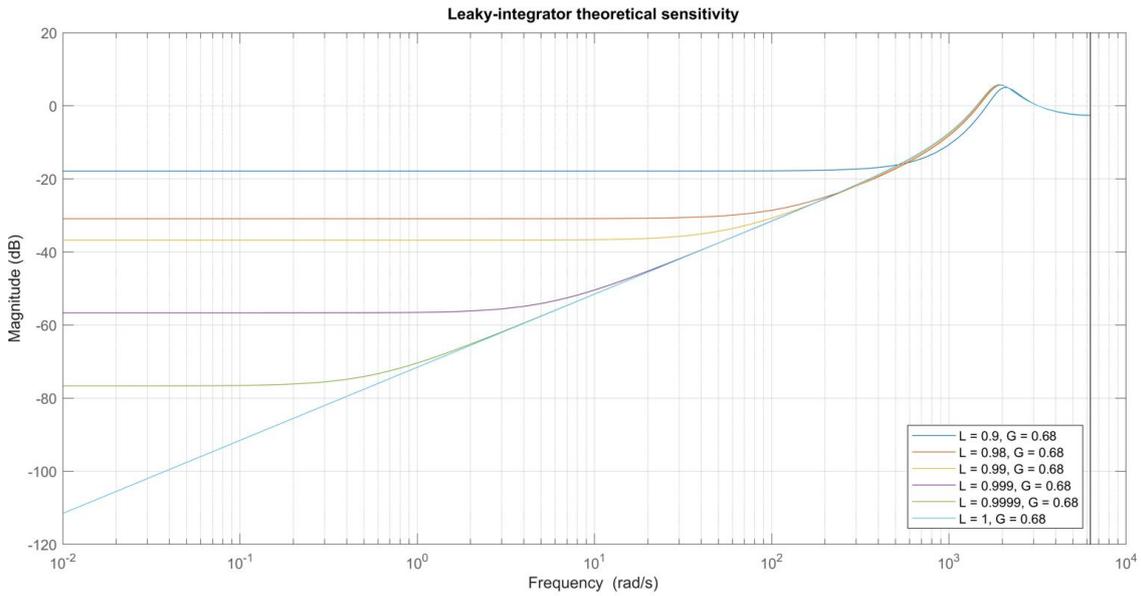


Fig. 28: Representación de distintas curvas de rechazo teóricas para distintos valores de λ al fijar $G=0.68$.

Se observa que, a medida que el parámetro λ aumenta y se aproxima a 1, la curva de rechazo alcanza valores de atenuación cada vez más bajos. En el caso de $\lambda = 1$, se obtiene un comportamiento similar al de un controlador PI, en el cual la atenuación disminuye con una pendiente de -20 dB/dec a medida que se acerca a la frecuencia de 0 Hz. Por consiguiente, resulta deseable seleccionar un valor de λ lo más grande posible. En este sentido, se ha optado por $\lambda = 0.999$ como un valor adecuado para las simulaciones. Por tanto, la sintonización del leaky-integrator propuesta en este primer análisis sería $G = 0.68$ y $\lambda = 0.999$.

Estos valores de G y λ han sido implementados en DASP para la simulación del rendimiento de la estrategia de control. A partir de los resultados obtenidos, se han calculado las PSDs del error de control medido por el sensor (PSD_y) y la perturbación atmosférica aplicada (PSD_d). El resultado se muestra en la Fig. 29.

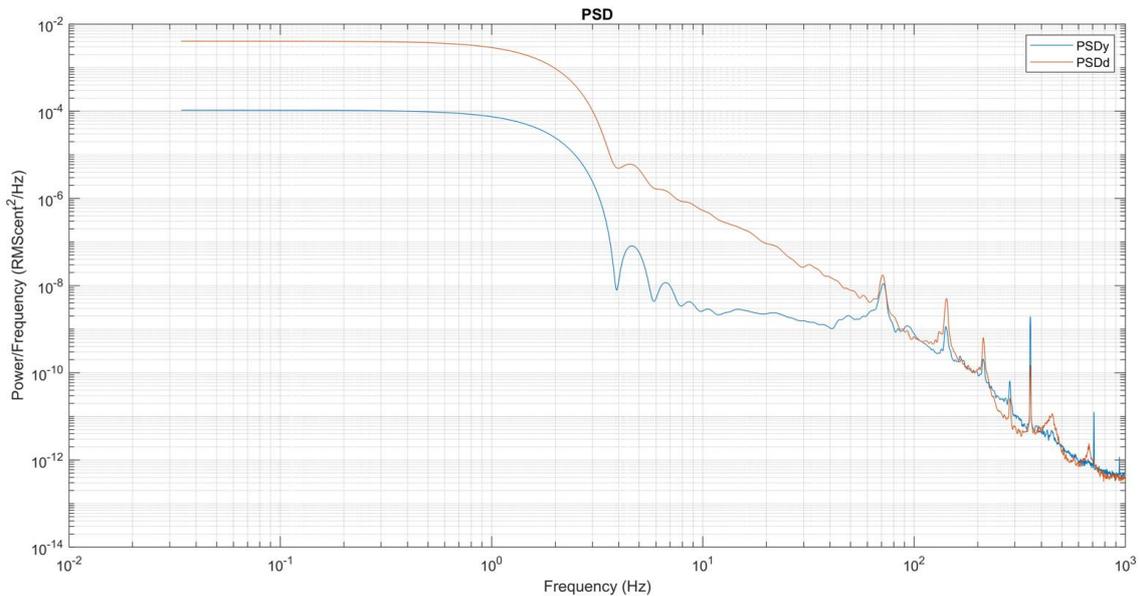


Fig. 29: PSDs obtenidas a partir de una simulación con un leaky-integrator ($G=0.68$; $\lambda=0.999$).

A partir de las PSDs anteriores se ha calculado la curva de sensibilidad obtenida a partir de los datos del simulador DASP. En la Fig. 30 se puede ver un ejemplo de la comparación de los resultados obtenidos experimentalmente (DASP) con los teóricos para un leaky-integrator con un $\lambda = 0.999$, una ganancia de $G = 0.68$, un $r0 = 0.25$ m y un filtrado de valores singulares $rcond = 0.02$. A diferencia del análisis teórico, se observa que a partir de 100 Hz la función de sensibilidad obtenida de los datos de DASP alcanza los 0 dB (cesa la atenuación de la perturbación). Además, la curva de rechazo obtenida de DASP para frecuencias inferiores a 100 Hz presenta una menor atenuación que la curva teórica. En un principio, se estableció la hipótesis de que esta diferencia podría deberse a que en el simulador DASP se incluyen distintos factores que no se tienen en cuenta en la aproximación teórica (interacción de actuadores, errores y ruidos introducidos por el sensor, entre otros). Este punto se abordará con más detenimiento en la sección 5.4.

Parte de esta discrepancia también podría deberse al método empleado para la estimación de densidad espectral de potencia de Welch, la cual reduce efectos de ruidos al hacer un promediado, pero también limita la representación para las frecuencias más bajas.

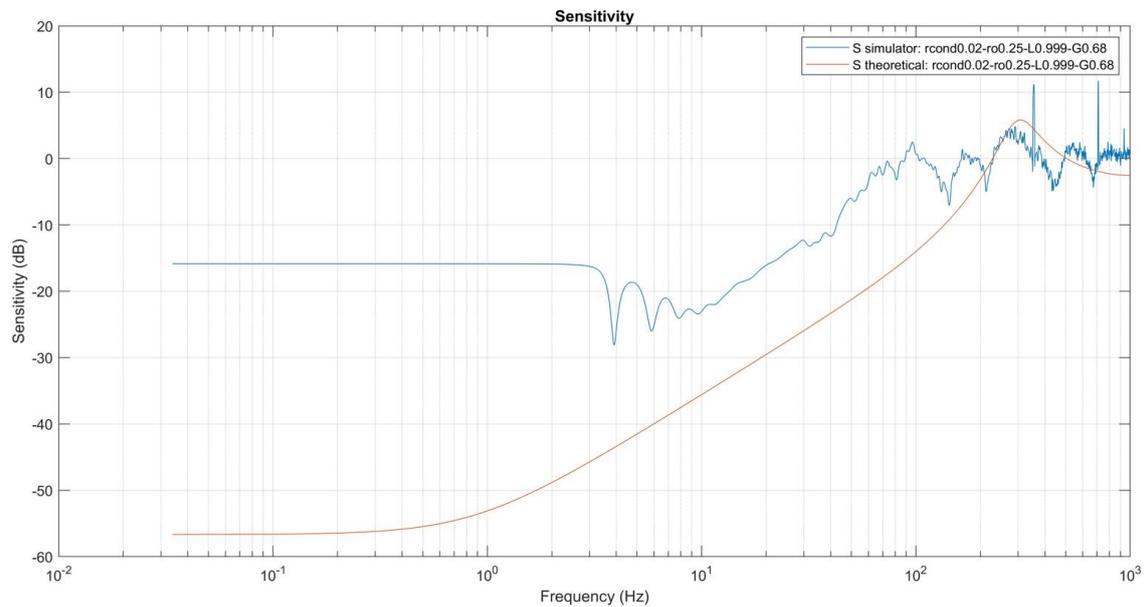


Fig. 30: Comparación de curva de sensibilidad teórica y simulada para un leaky-integrator con $\lambda=0.999$ y $G=0.68$ ($r0=0.25$; $rcond=0.02$).

Con el fin de analizar los resultados del controlador leaky-integrator, se mostrarán los valores del cociente de Strehl y los valores RMS de la superficie del sensor de frente de onda para todos los centroides. Se han evaluado dos escenarios variando la intensidad de la perturbación atmosférica: una primera situación en la que se utiliza un valor de $r0 = 10$ cm, y otra en la que se utiliza un valor de $r0 = 25$ cm.

Con el objeto de tener una mejor visualización del comportamiento general de las simulaciones, para el procesado de resultados de los cocientes de Strehl y los valores RMS se usa una gráfica tipo box plot. Los resultados del error de control (valores RMS de la superficie del sensor de frente de onda para cada instante de tiempo) se representan en la Fig. 31.

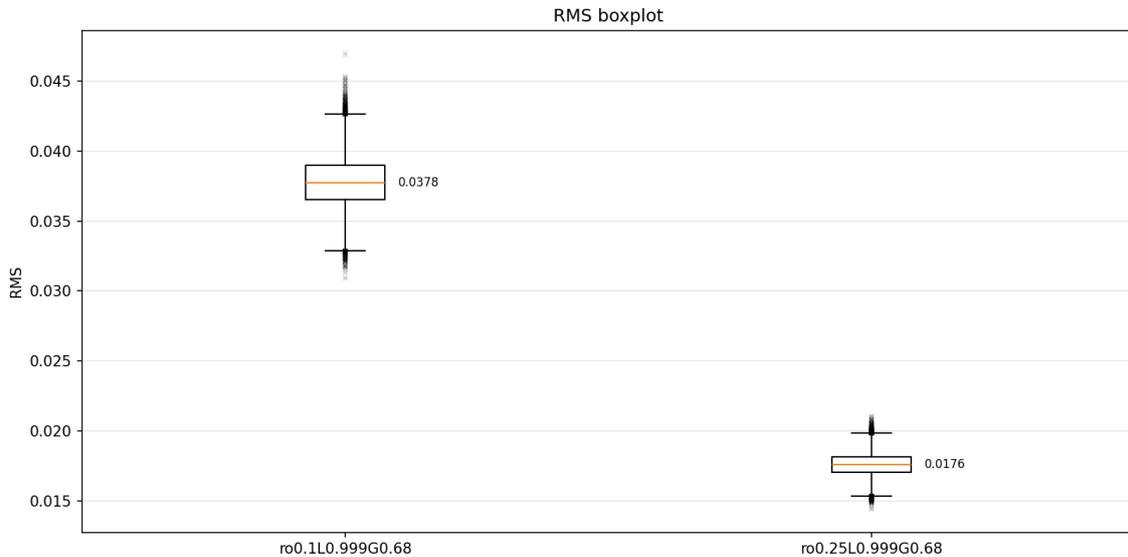


Fig. 31: Box plot de valores RMS (escala en píxeles) frente a simulaciones del leaky-integrator con diferentes valores $r0$. Extremo superior del bigote: máximo no atípico; extremo superior de la caja: percentil 75; línea naranja: mediana; extremo inferior de la caja: percentil 25; extremo inferior del bigote: mínimo no atípico; x: valores atípicos.

Se observa que, cuanto mayor es el parámetro de Fried, mejores resultados se obtienen. Cabe recordar que un mayor valor de este parámetro corresponde a una atmósfera más generosa en términos de perturbación. Para un $r0$ de 25 cm se obtiene una mediana de 0.0176 para la desviación, mientras que para un $r0$ de 10 cm se obtiene una mediana de 0.0378 con una mayor dispersión. Al representar los valores RMS frente al tiempo se obtiene la gráfica de la Fig. 32. En la gráfica inferior se representa una ampliación de la superior, en la que se puede observar claramente el proceso de creación de la PMX (primera parte de la imagen), el transitorio (comienzo del control y aplicación de la perturbación) y el estacionario (entendido como proceso de corrección en lazo cerrado a lo largo del tiempo).

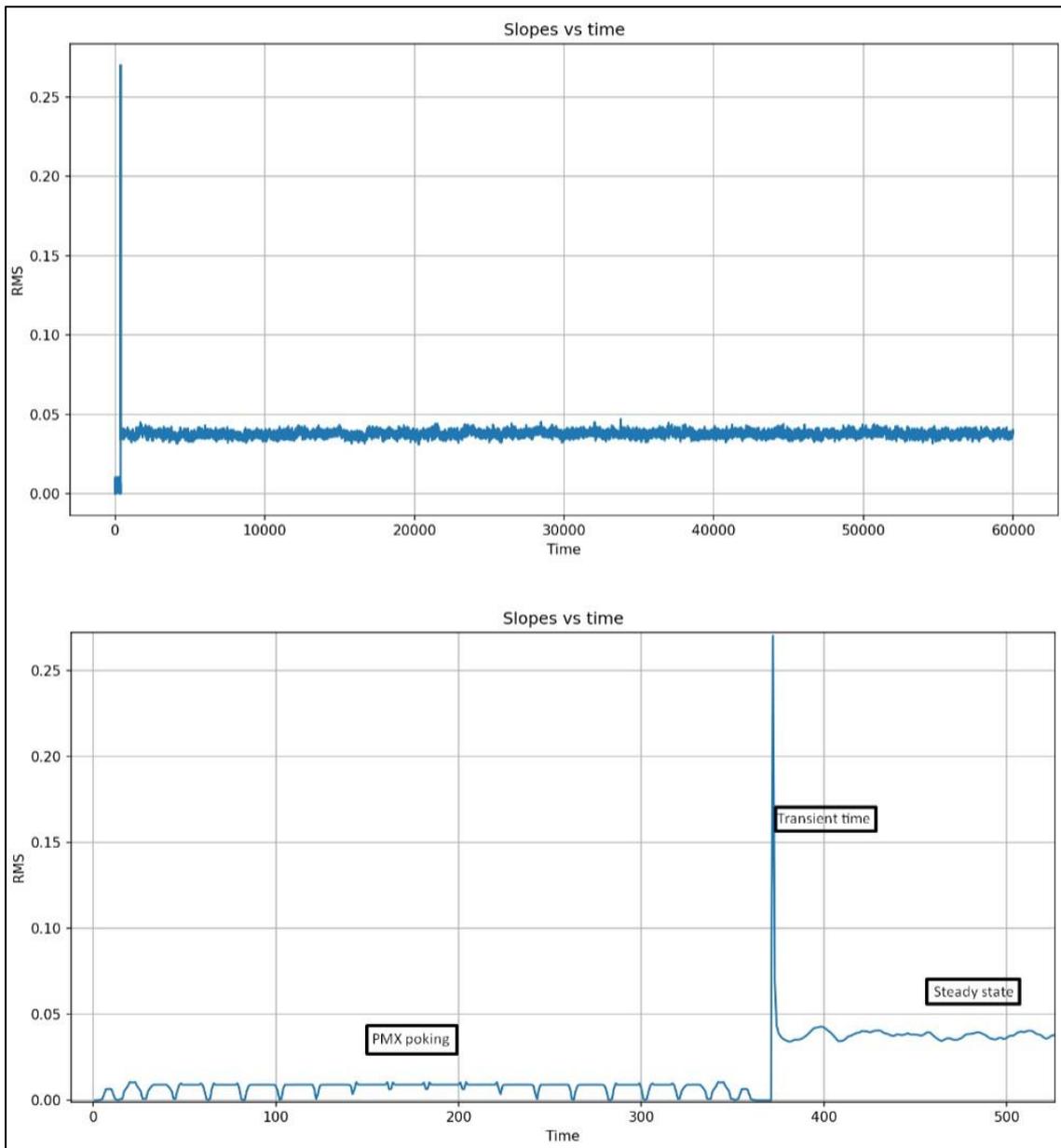


Fig. 32: Valores RMS de las pendientes de los centroides de toda la superficie del sensor (slopes) frente al tiempo para un leaky-integrator ($G=0.68$; $\lambda=0.999$) con $r_0=10$ cm. La gráfica inferior corresponde a un zoom de la gráfica superior.

Al igual que para los valores RMS, se ha realizado un análisis de los valores de Strehl alcanzados en las dos simulaciones. Los resultados se muestran en la Fig. 33. Estos resultados confirman que se obtienen mejores rendimientos en un escenario con mejores condiciones atmosféricas (r_0 mayores). Para el caso de los cocientes de Strehl, con una atmósfera mala ($r_0 = 10$ cm) se obtienen valores entre 0.67 y 0.81 con una mediana en

0.7633. Para el caso de una buena atmósfera ($r_0 = 25\text{cm}$) se obtiene mucha menos dispersión, con valores entre 0.91 y 0.96 con una mediana en 0.9406.

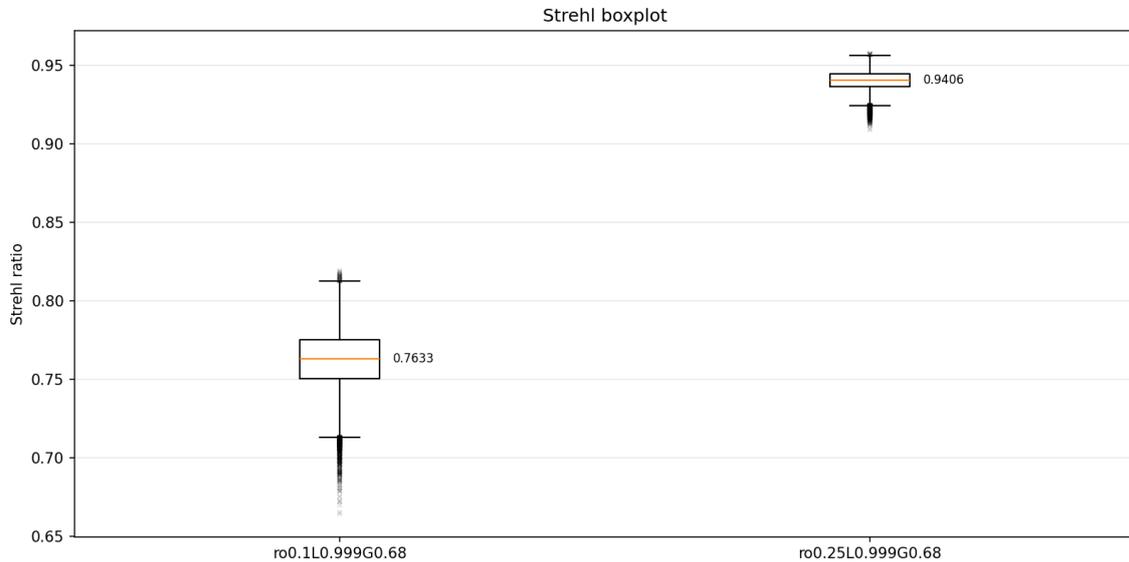


Fig. 33: Box plot de cocientes de Strehl frente a simulaciones del leaky-integrator con diferentes valores r_0 . Extremo superior del bigote: máximo no atípico; extremo superior de la caja: percentil 75; línea naranja: mediana; extremo inferior de la caja: percentil 25; extremo inferior del bigote: mínimo no atípico; x: valores atípicos.

5.3. Resultados de la simulación para el controlador PI

En este apartado se presentan los resultados del análisis y rendimiento alcanzado con el controlador PI. Al igual que para el caso del Leaky-integrator, se comenzará el análisis estudiando la función de sensibilidad teórica en lazo cerrado. Para ello, se ha empleado un script realizado en Matlab para representar el diagrama de Bode que se muestra en la Fig. 34.

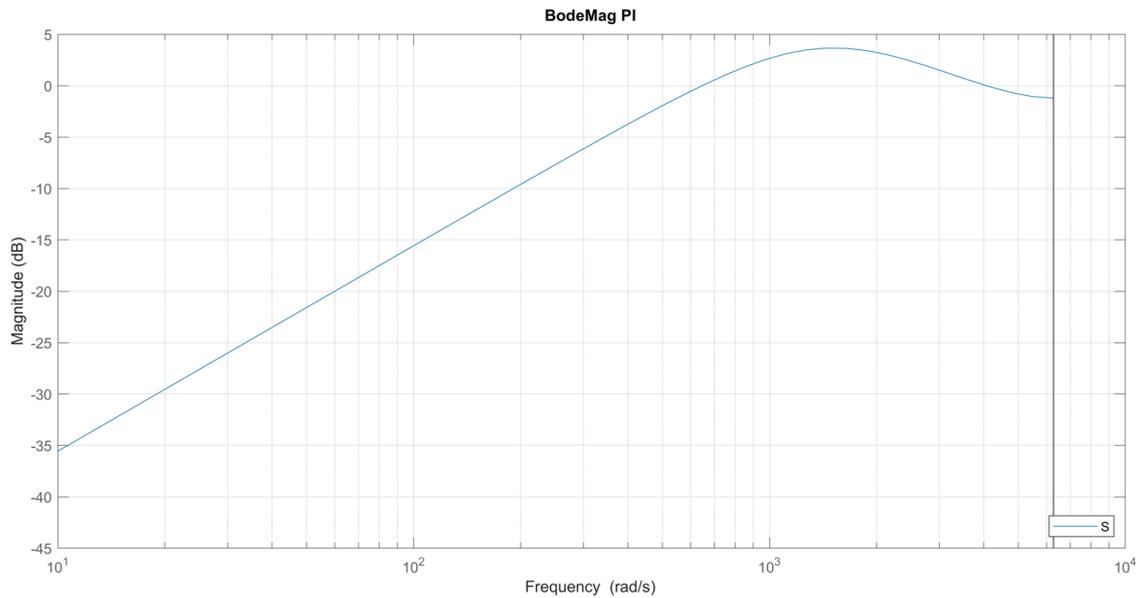


Fig. 34: Función de sensibilidad para un controlador PI ($K_p=0.3$; $K_i=600$).

Al contrario que el leaky integrator, se observa que la curva de rechazo del controlador PI presenta una atenuación continuada de la perturbación de -20 dB/dec a medida que se acerca a la frecuencia de 0 Hz.

Para la sintonización del controlador PI se ha propuesto obtener una curva de rechazo similar a la alcanzada para el caso del leaky-integrator en términos de valores de atenuación. De esta forma, la principal diferencia entre ambos esquemas reside en la capacidad del controlador PI para la corrección a bajas frecuencias. En la Fig. 35 se presenta la función de sensibilidad del lazo de control correspondiente a un controlador PI con $K_p = 0.7$ y $K_i = 2500$.

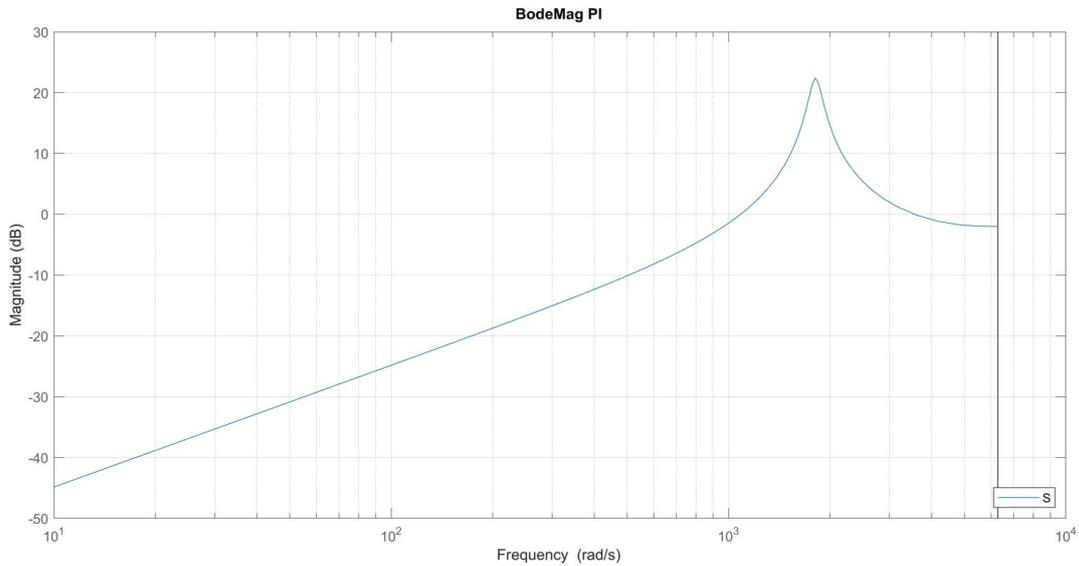


Fig. 35: Función de sensibilidad de un controlador PI con $K_p=0.7$ y $K_i=2500$.

Siguiendo el mismo procedimiento que se usó en el análisis del leaky-integrator, se ha empleado el simulador DASP para obtener datos experimentales y analizar la función de sensibilidad, comparándola con los análisis teóricos previos. Para ello, se ha implementado de forma satisfactoria la modificación en el código de la clase *recon* de DASP para la introducción de un controlador PI. En la Fig. 36 se muestran las PSDs obtenidas para el controlador PI.

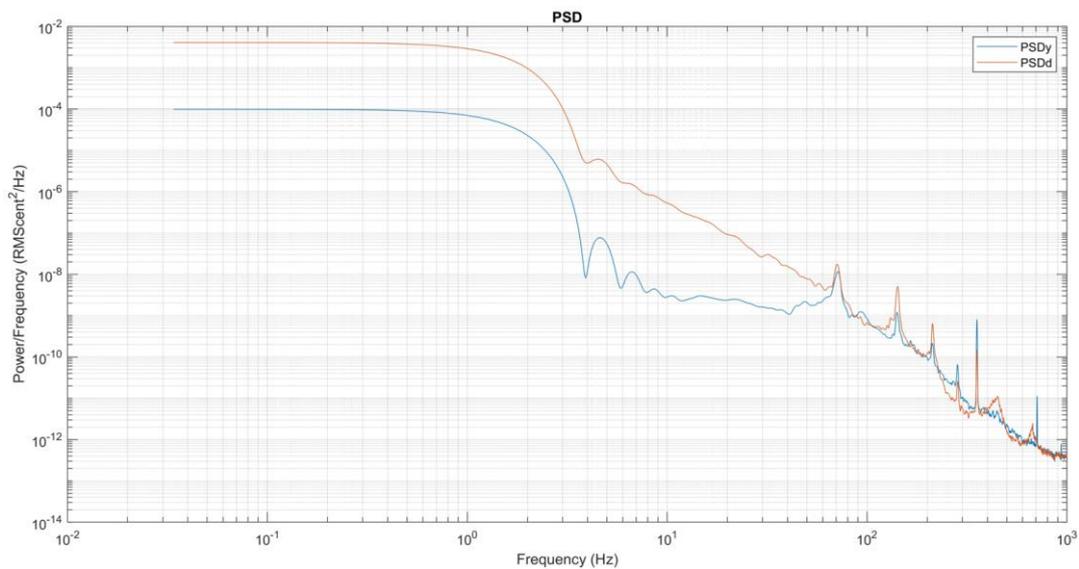


Fig. 36: PSDs obtenidas a partir de una simulación con un controlador PI ($K_p=0.7$; $K_i=2500$).

Tanto las PSDs como la curva de rechazo resultante para el controlador PI sintonizado con $K_p = 0.7$ y $K_i = 2500$ son muy similares a las del leaky-integrator. En la Fig. 37 se muestra una comparativa de las PSDs de error de control obtenidas para ambos controladores. Se puede comprobar que, a pesar de que teóricamente el controlador PI debería ofrecer una mejora significativa a frecuencias bajas, la simulación muestra que la mejora en la PSD del residuo (azul para el leaky-integrator y amarilla para el controlador PI) es mínima.

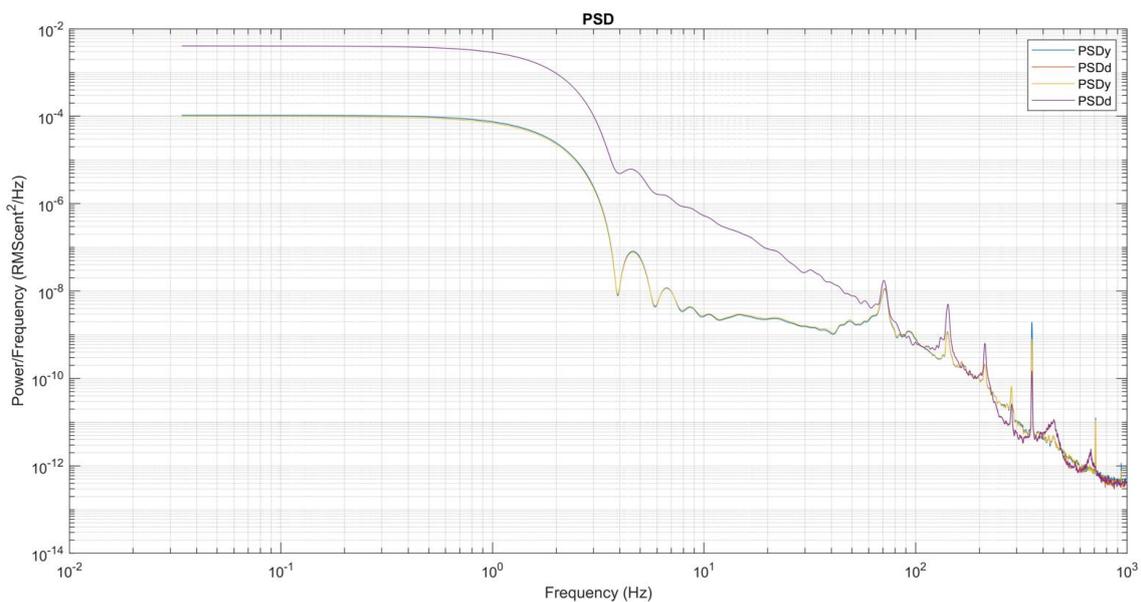


Fig. 37: PSDs obtenidas a partir de una simulación con un controlador PI ($K_p=0.7$; $K_i=2500$), en violeta y amarillo, y para un leaky integrator ($G=0.68$; $L=0.999$), en rojo y azul.

Como ocurría en el caso del leaky integrator, en la curva de rechazo del controlador PI, representada en la Fig. 38, se evidencia un desplazamiento respecto a la curva teórica para el que se presentaron las mismas hipótesis (inclusión de diversos factores por parte de DASP, como la interacción de actuadores o errores introducidos por el sensor, entre otros).

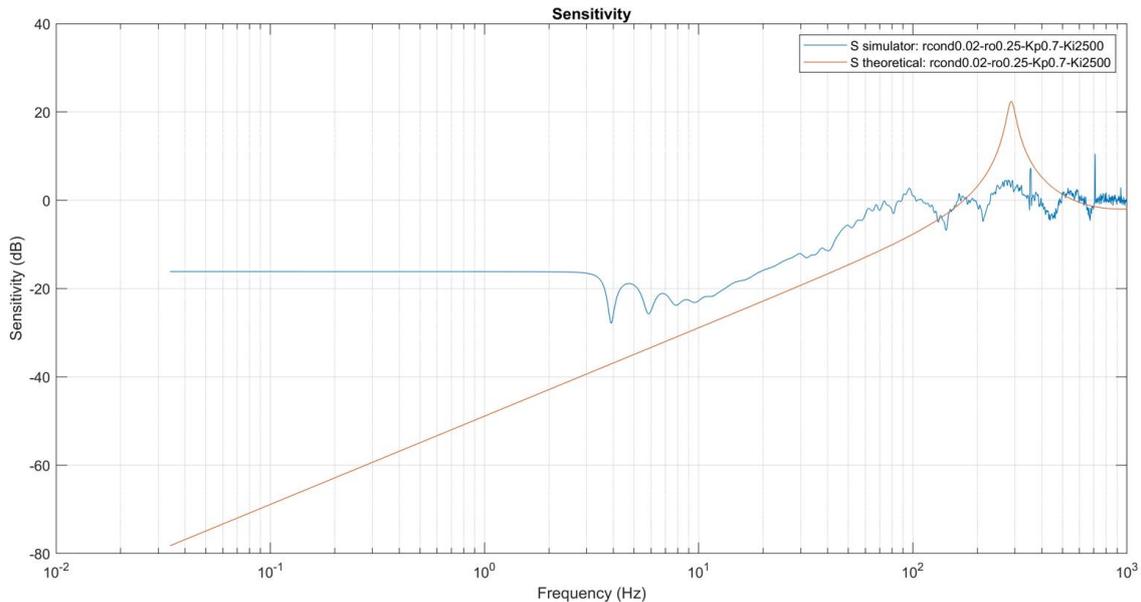


Fig. 38: Comparación de curva de sensibilidad teórica y simulada para un controlador PI con $K_p=0.7$ y $K_i=2500$ ($r_0=0.25$; $r_{cond}=0.02$).

Para evaluar el rendimiento del lazo de control a partir de los resultados de la simulación en DASP del controlador PI se sigue el mismo procedimiento descrito para los resultados del leaky-integrator.

En la Fig. 39 se representan los valores RMS resultantes de un sistema con un controlador PI comparados con los del controlador leaky-integrator. Tal y como se contemplaba en el análisis teórico, se puede ver una pequeña mejoría en la corrección en lazo cerrado al usar un controlador PI en ambas atmósferas. En el caso del controlador PI, con un $r_0 = 10$ cm se obtiene una mediana de 0.0365 de desviación y con un $r_0 = 25$ cm se alcanza una mediana de 0.017. No obstante, a tenor de los análisis anteriores, esta mejora podría deberse a pequeñas discrepancias en la sintonización de ambos controladores (y, por ende, en la capacidad de rechazo del lazo) y no tanto a la capacidad del controlador PI de corregir el error en el estacionario.

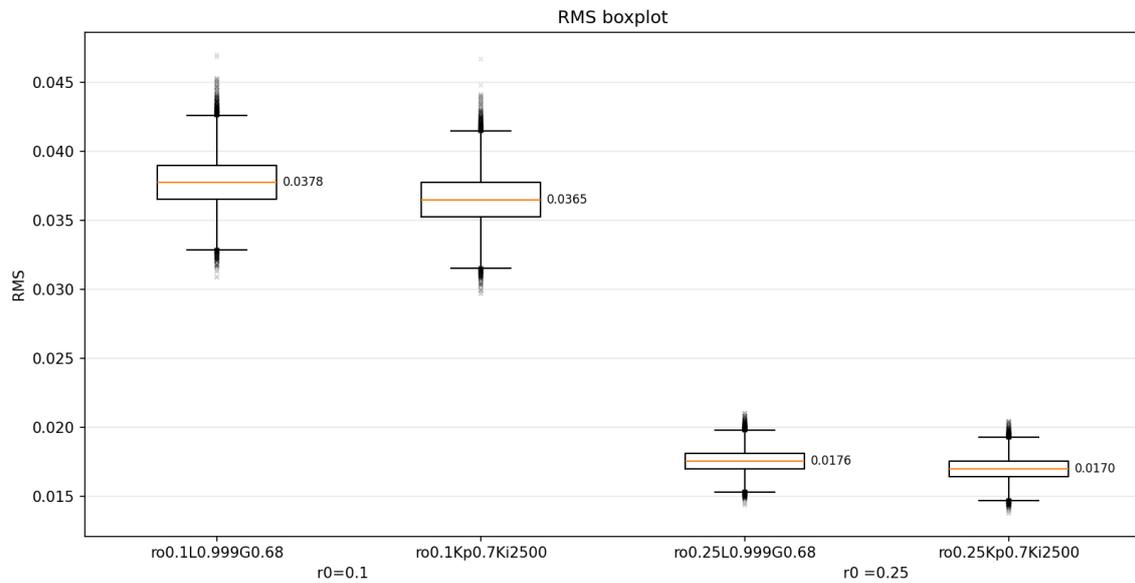


Fig. 39: Box plot de valores RMS (escala en píxeles) frente a simulaciones del controlador PI con diferentes valores r_0 comparados con el leaky-integrator. Extremo superior del bigote: máximo no atípico; extremo superior de la caja: percentil 75; línea naranja: mediana; extremo inferior de la caja: percentil 25; extremo inferior del bigote: mínimo no atípico; x: valores atípicos.

A la hora de analizar la calidad óptica del telescopio simulado medido en términos de Strehl, se observa que los resultados son prácticamente los mismos que con el leaky-integrator. En la Fig. 40 se representan los cocientes de Strehl de un sistema con un controlador PI comparados con los del controlador leaky-integrator. En este caso se puede ver que, aunque se alcanzan unos valores adecuados e, incluso, mejora ligeramente al controlador anterior, la mejoría alcanzada no es significativa. El controlador PI obtiene una mediana de 0.7640 en el cociente de Strehl para una atmósfera con $r_0 = 10$ cm y una mediana de 0.9407 para una atmósfera con $r_0 = 25$ cm.

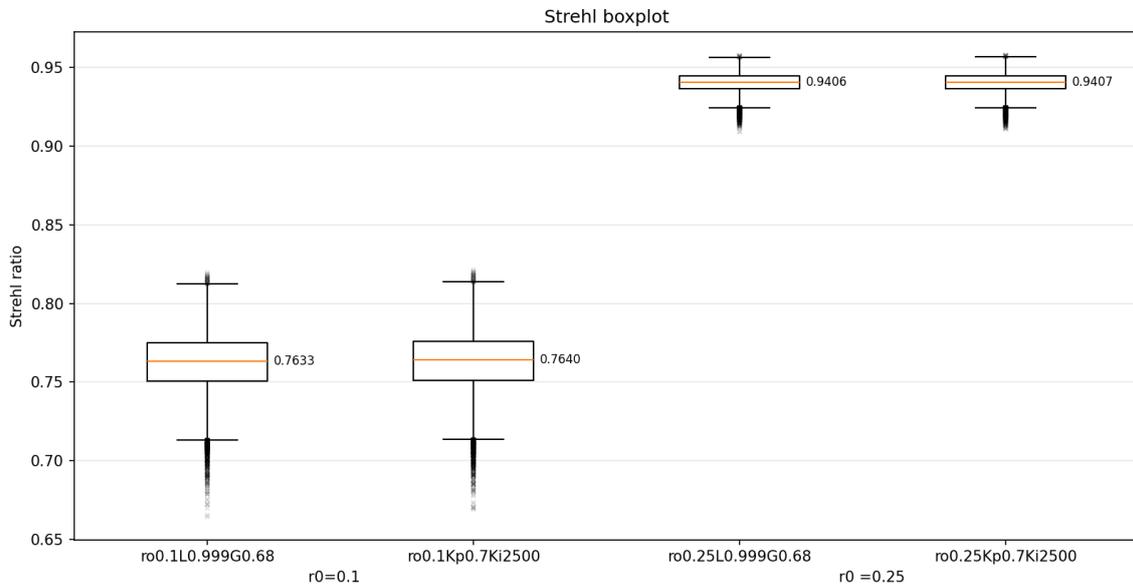


Fig. 40: Box plot de cocientes de Strehl frente a simulaciones del controlador PI con diferentes valores r_0 comparados con el leaky-integrator. Extremo superior del bigote: máximo no atípico; extremo superior de la caja: percentil 75; línea naranja: mediana; extremo inferior de la caja: percentil 25; extremo inferior del bigote: mínimo no atípico; x: valores atípicos.

En la Fig. 41 se muestra la evolución del error RMS frente al tiempo para el controlador PI.

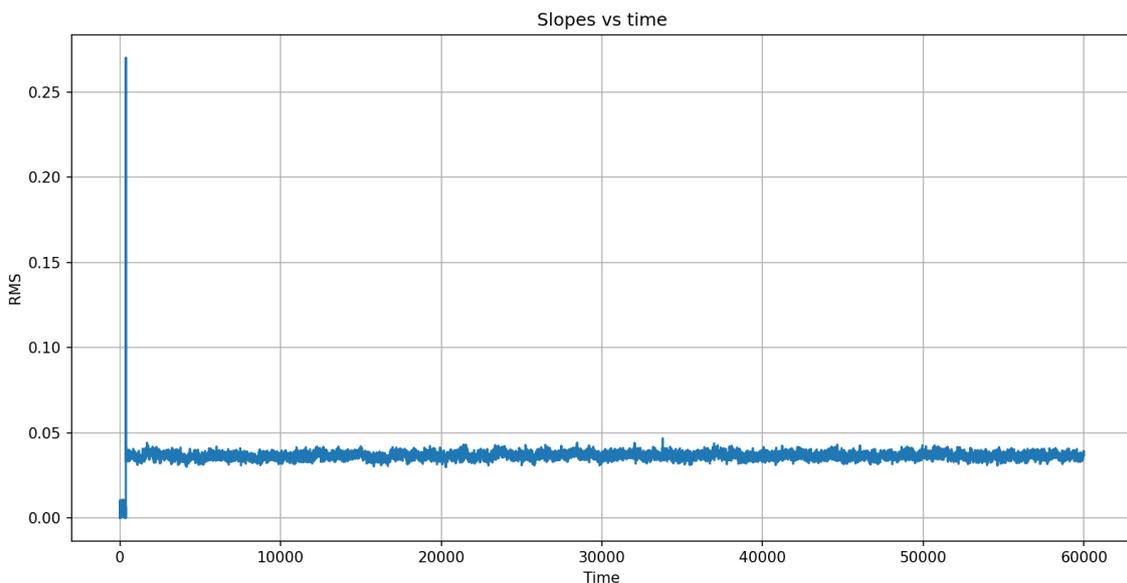


Fig. 41: Valores RMS de las pendientes de los centroides de toda la superficie del sensor (slopes) frente al tiempo para un controlador PI ($K_p=0.7$; $K_i=2500$) con $r_0=10$ cm.

5.4. Influencia de las interacciones en el rendimiento del lazo de control

A diferencia de la hipótesis de partida sustentada sobre el beneficio teórico de la implementación de un controlador PI frente a un leaky-integrator, los resultados del controlador PI en simulación muestran que el control de la óptica adaptativa mejora mínimamente al usar este tipo de controlador. En concreto, al analizar los dos controladores en simulación se observa que la magnitud de la atenuación a bajas frecuencias se ve limitada. Aunque este efecto es propio del leaky-integrator (ausencia de polo en el origen), esta limitación no debería aparecer en el caso del controlador PI. Se ha observado que la curva de rechazo del lazo de control con un controlador PI está limitada en torno a -20 dB, en contraposición a la caída teórica de -20 dB/dec cuando la frecuencia tiende a 0 Hz. Este resultado lleva a proponer un estudio sobre el origen de la limitación de la corrección a bajas frecuencias.

En un primer momento, se proponen dos hipótesis de estudio que pudieran explicar este fenómeno:

1. A diferencia del análisis teórico realizado en Matlab, el simulador DASP incluye otros efectos propios de los distintos elementos incluidos en el lazo que podrían afectar a la capacidad de corrección. Entre estos efectos se incluyen: ruidos de medida del sensor; precisión del algoritmo de cálculo de centroides, entre otros.
2. A diferencia del análisis teórico realizado en Matlab, el lazo de control real se trata de un sistema MIMO en el que existen fuertes interacciones entre el efecto de cada actuador con los desplazamientos de centroides registrados en varias subaperturas. Esto tiene un impacto directo en el cálculo de la actuación a aplicar a partir de la matriz RMX y el error de centroides.

Como punto de partida de este análisis, se ha propuesto comenzar por el estudio de la segunda hipótesis planteada. Por tanto, se propone analizar el impacto de las interacciones en el rendimiento del lazo de control. Para ello, se ha creado un modelo en Simulink basado en los dos esquemas de control mostrados en la Fig. 42:

- Lazo de control sin interacciones. Se simula el comportamiento de un lazo de control MIMO sin interacciones. Este esquema asume que se puede actuar sobre cada centroide de manera independiente.
- Lazo de control con interacciones. Se simula el comportamiento de un lazo de control MIMO con interacciones. Para ello, se añade la matriz RMX medida en DASP. Además, para hacer la conversión actuación-centroide se aplica la matriz PMX como modelo estático del espejo deformable.

En ambos casos, se aplica el mismo controlador PI obtenido en la sección 5.3 para el control de cada actuador. El simulador es alimentado con la medida de los centroides en lazo abierto obtenida a partir de DASP (perturbación de entrada). El error de control resultante es registrado para su posterior análisis.

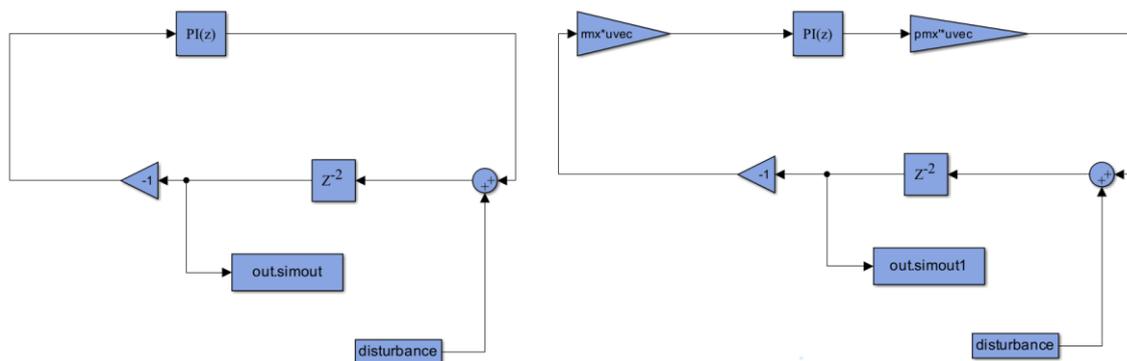


Fig. 42: Modelo en Simulink en el que se simulan los lazos de control sin PMX y RMX (izquierda) y con PMX y RMX (derecha).

La Fig. 43 muestra la curva de rechazo obtenida a partir de centroides individuales para el caso del esquema sin interacciones. Se observa que el comportamiento de la curva de rechazo se asimila bastante al comportamiento teórico esperado para el controlador PI, con una disminución en la magnitud de atenuación a bajas frecuencias de -20 dB por década

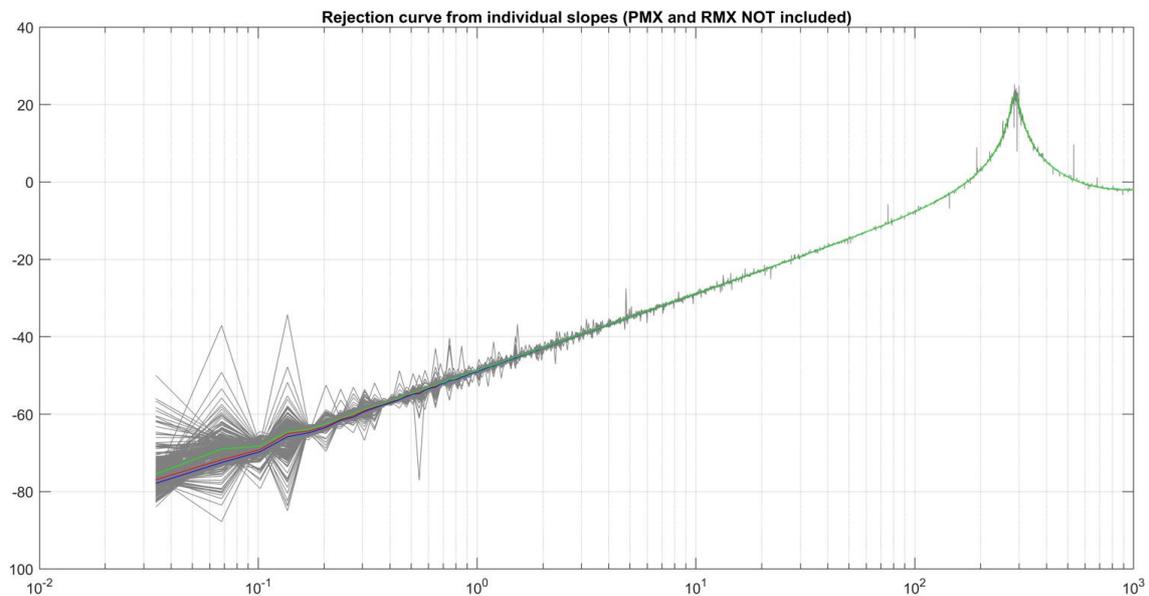


Fig. 43: Curva de rechazo para centroides individuales sin PMX y RMX con un controlador PI ($K_p=0.7$; $K_i=2500$). Se representa el percentil 75 (verde), la mediana (rojo) y el percentil 25 (azul) junto con todas las curvas de rechazo calculadas de forma individual para cada centroide (x,y) .

Se ha repetido el mismo procesamiento para el caso del lazo de control con interacciones. El resultado se muestra en la Fig. 44. Como ocurría al analizar los resultados de DASP, se observa que a bajas frecuencias la curva de rechazo deja de seguir el comportamiento esperado por el controlador PI. Además, el sombreado en color gris fruto de la superposición de todas las curvas de rechazo obtenidas individualmente pone de manifiesto que la utilización de un mismo controlador para todas las relaciones centroides-actuador podría afectar especialmente a algunas subaperturas y, por ende, al rendimiento global de la estrategia.

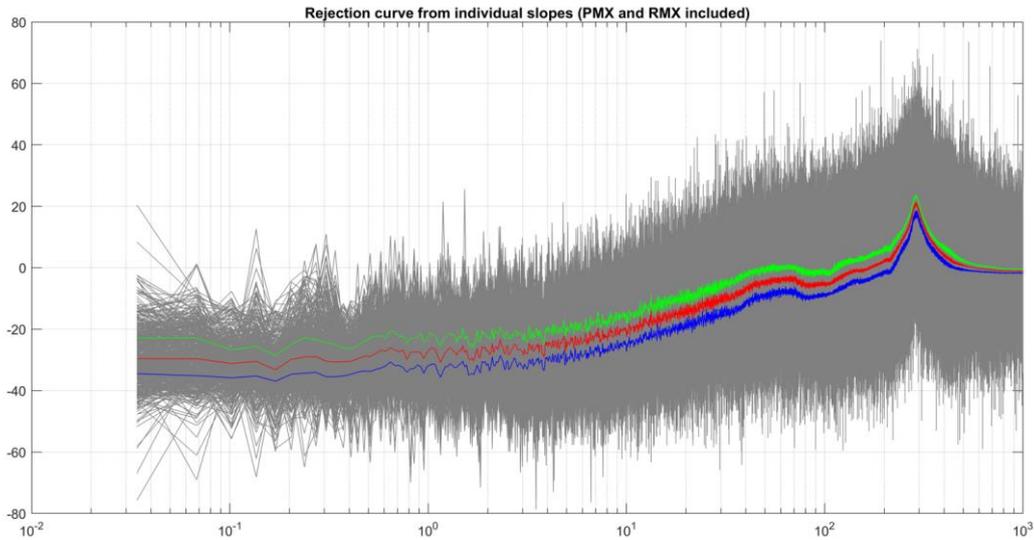


Fig. 44: Curva de rechazo para centroides individuales incluyendo PMX y RMX con un controlador PI ($K_p=0.7$; $K_i=2500$). Se representa el percentil 75 (verde), la mediana (rojo) y el percentil 25 (azul) junto con todas las curvas de rechazo calculadas de forma individual para cada centroide (x,y) .

Para una mejor visualización del efecto que introducen las interacciones en el sistema, en la Fig. 45 se compara el percentil 50 de cada curva de rechazo (lazos de control en Simulink con y sin interacción) con la curva de rechazo teórica del controlador PI.

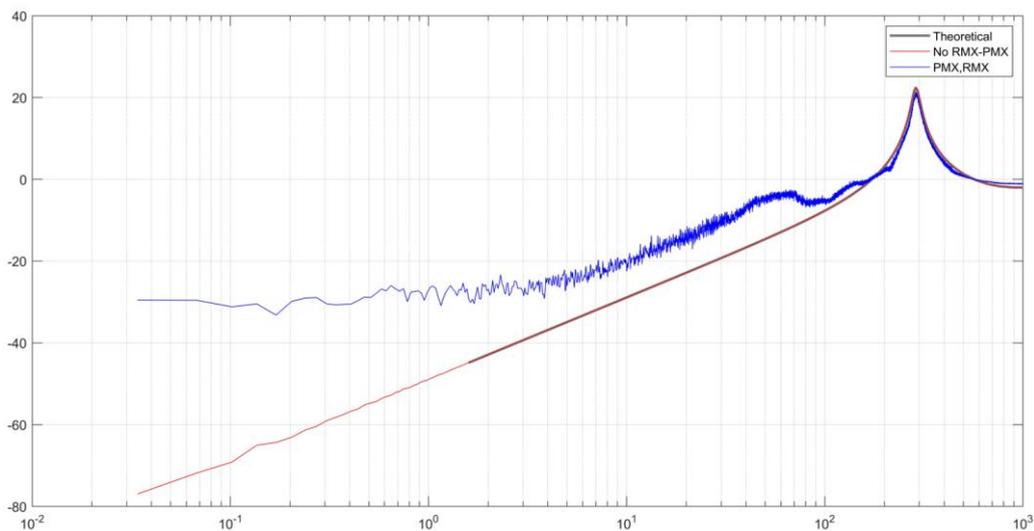


Fig. 45: Curva de rechazo teórica (gris) del PI ($K_p=0.7$; $K_i=2500$), curva de rechazo para centroides individuales incluyendo PMX y RMX (azul) y curva de rechazo para centroides individuales sin incluir PMX y RMX (rojo).

Así, se puede ver claramente cómo la curva de rechazo del sistema afectado por las matrices de interacción y reconstrucción se aleja del comportamiento teórico a bajas frecuencias en consonancia con el efecto observado en el simulador DASP.

Este análisis pone de manifiesto que las interacciones presentes en el sistema entre los elementos de actuación (actuadores individuales del espejo deformable) y sensado (centroides de las distintas subaperturas) suponen una potencial fuente de limitación en el rendimiento de la estrategia de control. En este estudio, este efecto ha mostrado tener mayor impacto que la propia estructura de control empleada (leaky-integrator vs. controlador PI).

Para terminar de confirmar lo anterior, en la Fig. 46 se representa la curva de rechazo del controlador PI obtenida a partir de los datos de la simulación en DASP, en la que se puede confirmar el comportamiento explicado anteriormente para los casos en los que se incluyen las matrices PMX y RMX. Se compara con la curva de rechazo obtenida por el percentil 50 en Simulink incluyendo la interacción y con la curva teórica. Para esta representación se usan menos ventanas de Hamming a la hora de hacer el promediado para obtener más información y ver mejor el efecto que se comenta. Es por ello que la curva de rechazo obtenida a partir del simulador DASP se ve más ruidosa que en otros casos.

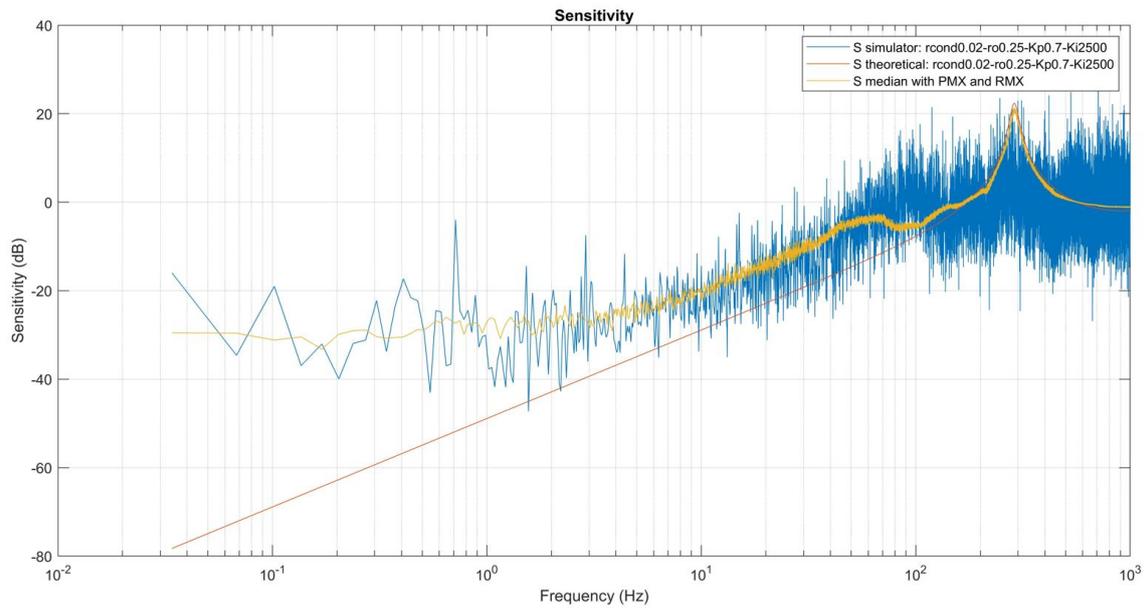


Fig. 46: Curva de rechazo de los valores RMS de cada superficie de centroides simulados en DASP (azul) para un controlador PI ($K_p=0.7$; $K_i=2500$), curva teórica (rojo) y curva de rechazo obtenida por el percentil 50 en Simulink con interacción (amarillo).

6. Conclusiones y líneas abiertas

6.1. Conclusiones

La óptica adaptativa se ha establecido como una técnica indispensable en los telescopios de última generación para la observación de objetos celestes desde la Tierra. En el marco del proyecto del Telescopio Solar Europeo se trabaja en el diseño y validación de una estrategia de óptica adaptativa multiconjugada que asegure correcciones en campos de visión de hasta 60 arcosegundos. Para ello, se ha planteado una hoja de ruta que permita evaluar distintos esquemas de corrección, así como estructuras de control más adecuadas a la naturaleza del problema.

Atendiendo al desarrollo actual de dicho proyecto, este Trabajo Fin de Grado ha hecho contribuciones en el esquema SCAO de EST relativas a: (i) el estudio y sintonización en simulación de un controlador tipo leaky-integrator similar al empleado actualmente en las pruebas realizadas en banco de pruebas de EST, (ii) la propuesta, diseño e implementación en el simulador DASP de un controlador PI, así como el análisis de su rendimiento frente al controlador anterior, y (iii) el análisis del efecto que introducen las interacciones entre los elementos de actuación y sensado sobre el rendimiento de la corrección del esquema de control.

La propuesta de implementación del controlador PI surge de las limitaciones de partida identificadas en el controlador leaky-integrator. Este controlador incorpora un factor de olvido en su término integral que minimiza la integración pasada para otorgar robustez frente a errores de medición. Sin embargo, el análisis del controlador llevado a cabo evidencia que este factor de olvido limita la atenuación a frecuencias bajas, afectando al rendimiento de la corrección. De forma teórica, se ha observado que un controlador PI no presenta esta limitación a frecuencias bajas al introducir un polo en el origen (término integral).

Para evaluar la mejora introducida, en este trabajo se ha modificado el simulador de óptica adaptativa DASP y se ha implementado un controlador tipo PI. Al realizar las simulaciones, se ha observado que la mejora real introducida en términos de reducción de error RMS y aumento de Strehl es limitada. El análisis de la curva de rechazo del

sistema de control ha evidenciado la presencia de una limitación de la corrección a bajas frecuencias que dista de la aproximación teórica.

Para dar respuesta al comportamiento observado, se ha analizado el efecto de las interacciones entre los elementos de actuación (actuadores individuales del espejo deformable) y sensado (centroides del sensor de frente de onda) en el rendimiento de la estrategia. El análisis realizado pone de manifiesto que las interacciones presentes en el sistema entre los elementos de actuación y sensado suponen una potencial fuente de limitación en el rendimiento de la estrategia de control.

En este estudio, este efecto ha mostrado tener mayor impacto que la propia estructura de control empleada (leaky-integrator vs. controlador PI). Además, se ha evidenciado que la sintonización de un único controlador para todos los actuadores del espejo deformable podría afectar especialmente a algunas subaperturas y, por ende, al rendimiento global de la estrategia. Esta conclusión es de gran importancia en la línea de investigación en la que se sitúa el trabajo, ya que abre una nueva línea de análisis apenas explorada hasta la fecha.

6.2. Líneas abiertas

Los resultados y conclusiones presentados en este trabajo plantean la posibilidad de desarrollar nuevas líneas de investigación de cara a la mejora del rendimiento de la estrategia de control de óptica adaptativa para EST:

- La influencia de las interacciones entre elementos de actuación y sensado pone de manifiesto la necesidad de profundizar en este análisis para caracterizar limitaciones reales y llevar a cabo la propuesta de una estrategia de control que contemple de manera específica este fenómeno.
- Frente a la aplicación de un mismo controlador para todos los actuadores del espejo, se debería llevar a cabo la propuesta de controladores específicos adaptados a la relación actuación-sensado registrada en la matriz de interacción. Esto también podría redundar en una reducción del efecto de las interacciones.
- Una vez se ha implementado y validado el controlador PI en el simulador DASP, el siguiente paso podría ser la implementación en el banco demostrador de óptica adaptativa para EST. Este banco de pruebas es un demostrador a pequeña escala

de óptica adaptativa solar con requisitos similares a los del EST. Para ello, sería necesario implementar el controlador PI en el software de control en tiempo real DARC (Durham AO Real-time Controller).

- En este trabajo, las simulaciones del controlador PI han estado centradas en la corrección de un objeto puntual. Un paso futuro podría ser evaluar el rendimiento de este controlador para objeto extenso (imagen del sol).
- Para todos los análisis realizados en este Trabajo Fin de Grado se ha empleado un esquema de óptica adaptativa basado en SCAO. Se prevé que el EST trabaje con un esquema MCAO, para lo que se ha definido una hoja de ruta con una serie de etapas previas. Si se llegase a validar el controlador PI en el banco de pruebas para SCAO, sería de interés la implementación en el esquema de corrección GLAO, el cual está diseñado para rechazar las aberraciones atmosféricas que afectan a la calidad de las observaciones astronómicas cerca del suelo.

7. Conclusions and future research lines

7.1. Conclusions

Adaptive optics has established itself as an indispensable technique in state-of-the-art telescopes for observing celestial objects from Earth. The European Solar Telescope project is working on the design and validation of a multi-conjugate adaptive optics strategy to ensure field-of-view corrections of up to 60 arcseconds. To this end, a roadmap has been proposed to evaluate different correction schemes, as well as control structures more suited to the nature of the problem.

In view of the current development of EST, this project has made contributions to the EST SCAO scheme relating to: (i) the study and tuning in simulation of a leaky-integrator type controller similar to the one currently used in the EST testbed tests, (ii) the proposal, design and implementation in the DASP simulator of a PI controller, as well as the analysis of its performance compared to the previous controller, and (iii) the analysis of the effect introduced by the interactions between the actuation and sensing elements on the correction performance of the control scheme.

The proposed implementation of the PI controller arises from the initial limitations identified in the leaky-integrator controller. This controller incorporates a forgetting factor in its integral component that minimises past integration to provide robustness against measurement errors. However, the analysis of the controller shows that this forgetting factor limits the attenuation at low frequencies, affecting the correction performance. Theoretically, it has been observed that a PI controller does not present this limitation at low frequencies when introducing a pole at the origin (integral component).

To evaluate the improvement introduced, in this project the DASP adaptive optics simulator has been modified and a PI type controller has been implemented. In the simulations, it has been observed that the real improvement introduced in terms of RMS error reduction and Strehl increase is limited. The analysis of the rejection curve of the control system has shown the presence of a limitation of the correction at low frequencies that is far from the theoretical approximation.

In response to the observed behaviour, the effect of the interactions between the actuation elements (individual actuators of the deformable mirror) and the sensing elements

(centroids of the wavefront sensor) on the performance of the strategy has been analysed. The analysis shows that the interactions present in the system between the actuation and sensing elements are a potential source of limitation in the performance of the control strategy.

In this study, this effect has been shown to have a greater impact than the control structure itself (leaky-integrator vs. PI controller). Furthermore, it has been shown that tuning a single controller for all actuators of the deformable mirror could particularly affect some sub-apertures and thus the overall performance of the strategy. This conclusion is of great importance in the line of research in which the work is situated, as it opens up a new line of analysis that has hardly been explored to date.

7.2. Future research lines

The results and conclusions presented in this work raise the possibility of developing new lines of research to improve the performance of the adaptive optics control strategy for EST:

- The influence of the interactions between actuation and sensing elements highlights the need to deepen this analysis in order to characterise real limitations and to propose a control strategy that specifically addresses this phenomenon.
- In contrast to the application of the same controller for all actuators in the mirror, specific controllers adapted to the actuation-sensation relationship recorded in the interaction matrix should be proposed. This could also result in a reduction of the effect of the interactions.
- Once the PI controller has been implemented and validated in the DASP simulator, the next step could be the implementation on the adaptive optics testbed for EST. This testbed is a small-scale solar adaptive optics demonstrator with similar requirements to those of the EST. For this, it would be necessary to implement the PI controller in the real-time control software DARC (Durham AO Real-time Controller).

- In this work, the simulations of the PI controller have been focused on the correction of a point-like object. A future step could be to evaluate the performance of this controller for a not point-like object (image of the sun).
- For all the analyses carried out in this project, an adaptive optics scheme based on SCAO has been used. It is foreseen that the EST will work with a MCAO scheme, for which a roadmap has been defined with a series of previous stages. If the PI controller is validated on the testbed for SCAO, the implementation in the GLAO correction scheme, which is designed to reject atmospheric aberrations that affect the quality of astronomical observations close to the ground, would be of interest.

8. Presupuesto

A continuación, se presenta el presupuesto que se ha elaborado para el proyecto, incluyendo las licencias de pago, el servidor que se ha utilizado de forma remota para utilizar DASP y la mano de obra. Los softwares que no se incluyen en el presupuesto, como el simulador DASP o Microsoft Visual Studio (utilizado para ejecutar los scripts de Python), son gratuitos.

PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL (PEM)					
1. MATERIAL					
1.1. SOFTWARE					
Descripción		Cantidad	Precio	Subtotal	Importe total
MATLAB		-	-	2.260,00 €	2.284,85 €
MATLAB Individual License		1	900	900,00 €	
Simulink Individual License		1	1.360,00 €	1.360,00 €	
Microsoft		-	-	24,85 €	
Windows 10 pro Licencia 1 PC		1	6,95 €	6,95 €	
Microsoft Office 2019 Professional Plus		1	17,90 €	17,90 €	
1.2. EQUIPO					
Horas	Descripción	Coste/hora (€/h)		Subtotal	Importe total
250	Servidor IAC	3		750,00 €	750,00 €
3. MANO DE OBRA					
Horas	Descripción	Coste/hora (€/h)		Subtotal	Importe total
300	Ingeniero	48		14.400,00 €	15.200,00 €
10	Servicio de asesoramiento especializado	80		800,00 €	
				PEM (sin aplicar impuestos)	18.234,85 €
PRESUPUESTO TOTAL					
Descripción		Importe			
Software		2.284,85 €			
Equipo		750,00 €			
Mano de obra		15.200,00 €			
PEM		18.234,85 €			
Costes indirectos (13%)		2.370,53 €			
Beneficio industrial (6%)		1.094,09 €			
SUBTOTAL		21.699,47 €			
IGIC (7%)		1.518,96 €			
TOTAL		23.218,43 €			

El coste total del proyecto asciende a veintitrés mil doscientos dieciocho euros con cuarenta y tres céntimos.

Bibliografía

- [1] E. Mora and M. C. del Puerto, "NORBERT HUBIN: 'El sistema de Óptica Adaptativa con estrellas guía láser nos permite mucha mejor cobertura del cielo y un mayor rendimiento del telescopio' | Instituto de Astrofísica de Canarias • IAC." Accessed: Jan. 10, 2024. [Online]. Available: <https://www.iac.es/es/divulgacion/noticias/norbert-hubin-el-sistema-de-optica-adaptativa-con-estrellas-guia-laser-nos-permite-mucha-mejor>
- [2] "ADONIS | ESO." Accessed: Jan. 10, 2024. [Online]. Available: <https://www.eso.org/public/teles-instr/lasilla/36/adonis/>
- [3] A. Glindemann *et al.*, "The VLT Interferometer: a unique instrument for high-resolution astronomy," P. J. Lena and A. Quirrenbach, Eds., Jul. 2000, p. 2. doi: 10.1117/12.390163.
- [4] "Very Large Telescope | ESO España." Accessed: Mar. 18, 2024. [Online]. Available: <https://www.eso.org/public/spain/teles-instr/paranal-observatory/vlt/>
- [5] L. C. Johnson *et al.*, "First light with adaptive optics: the performance of the DKIST high-order adaptive optics," in *Adaptive Optics Systems VII*, D. Schmidt, L. Schreiber, and E. Vernet, Eds., SPIE, Dec. 2020, p. 27. doi: 10.1117/12.2563427.
- [6] "EST FUNDING SOURCES." Accessed: May 01, 2024. [Online]. Available: <https://www.est-east.eu/funding>
- [7] "IACTEC Grandes Telescopios: El Telescopio Solar Europeo - EST | Instituto de Astrofísica de Canarias • IAC." Accessed: Dec. 29, 2023. [Online]. Available: <https://www.iac.es/es/proyectos/iactec-grandes-telescopios-el-telescopio-solar-europeo-est>
- [8] N. Feijóo *et al.*, "Optomechanical integration of the MCAO prototype testbed for EST," SPIE-Intl Soc Optical Eng, Jul. 2022, p. 240. doi: 10.1117/12.2627695.
- [9] D. Schmidt, "Setup and Characterization of the Multi-Conjugate Adaptive Optics System for the Solar Telescope GREGOR," Nov. 2012.
- [10] L. Zhang *et al.*, "Ground-layer adaptive optics for the New Vacuum Solar Telescope: Instrument description and first results," *Sci China Phys Mech Astron*, vol. 66, no. 6, Jun. 2023, doi: 10.1007/s11433-022-2107-4.
- [11] "ESO - AOModes." Accessed: May 01, 2024. [Online]. Available: https://www.eso.org/sci/facilities/develop/ao/ao_modes/.html#glao
- [12] "Wavefront Sensors | MEETOPTICS Academy." Accessed: Dec. 28, 2023. [Online]. Available: <https://www.meetoptics.com/academy/wavefront-sensors>
- [13] R. Ragazzoni, "Pupil plane wavefront sensing with an oscillating prism," *J Mod Opt*, vol. 43, no. 2, pp. 289–293, Feb. 1996, doi: 10.1080/09500349608232742.

- [14] M. J. Steinbock, "Implementation of Branch-Point-Tolerant Wavefront Reconstructor for Strong Turbulence Compensation," 2012. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/277761247>
- [15] S. Kuiper *et al.*, "Preliminary design of the Adaptive Secondary Mirror for the European Solar Telescope," in *Adaptive Optics Systems VIII*, D. Schmidt, L. Schreiber, and E. Vernet, Eds., SPIE, Aug. 2022, p. 80. doi: 10.1117/12.2629495.
- [16] G. Sivo *et al.*, "First on-sky SCAO validation of full LQG control with vibration mitigation on the CANARY pathfinder," *Opt Express*, vol. 22, no. 19, p. 23565, Sep. 2014, doi: 10.1364/OE.22.023565.
- [17] M. A. M. van Kooten *et al.*, "Predictive wavefront control on Keck II adaptive optics bench: on-sky coronagraphic results," *J Astron Telesc Instrum Syst*, vol. 8, no. 02, Jun. 2022, doi: 10.1117/1.JATIS.8.2.029006.
- [18] A. G. Basden *et al.*, "The Durham Adaptive Optics Simulation Platform (DASP): Current status," *SoftwareX*, vol. 7, pp. 63–69, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.softx.2018.02.005.
- [19] "agb32/dasp: DASP the Durham Adaptive optics Simulation Platform: Modelling and simulation of adaptive optics systems." Accessed: Apr. 17, 2024. [Online]. Available: <https://github.com/agb32/dasp>
- [20] N. Feijóo *et al.*, "MCAO testbed for European Solar Telescope (EST): first laboratory results for SCAO and GLAO configurations," 2023. doi: 10.13009/AO4ELT7-2023-098.