

Jornadas de Automática

Evaluación de estrategias de control y reconstrucción en óptica adaptativa

Gonzalez-Cava, Jose M.^{a,*}, Rodríguez Linares, Nicolás^b, León Gil, Javier^b, Torres Álvarez, Santiago^a, Hamilton Castro, Alberto^a, Núñez Cagigal, Miguel^c, Méndez Pérez, Juan Albino^a.

^a Departamento de Ingeniería Informática y de Sistemas, Universidad de La Laguna, La Laguna 38200, Tenerife, España.

^b Instituto de Astrofísica de Canarias, La Laguna, 38205, Tenerife, España.

^c European Solar Telescope Canarian Foundation, La Laguna 38205, Tenerife, España.

To cite this article: Gonzalez-Cava, Jose M, Rodríguez Linares, Nicolás, León Gil, Javier, Torres Álvarez, Santiago, Hamilton Castro, Alberto, Núñez Cagigal, Miguel, Méndez Pérez, Juan Albino. 2025. Evaluation of control and reconstruction strategies in adaptive optics. *Jornadas de Automática*, 46. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2025.46.12143>

Resumen

El diseño de sistemas de óptica adaptativa (AO) para telescopios de nueva generación exige estrategias de control capaces de compensar las distorsiones introducidas por la atmósfera terrestre con alta precisión espacial y temporal. Este trabajo presenta el estudio de un lazo de control para AO, centrado en dos componentes: el proceso de reconstrucción y el controlador. En primer lugar, se analiza el efecto del truncamiento modal aplicado a la pseudoinversa de Moore-Penrose para la obtención de la matriz de reconstrucción. Como resultado, se ha identificado un rango adecuado del parámetro de truncamiento ($\epsilon \approx 0.025\text{--}0.05$) que maximiza el índice de Strehl. Además, se evalúa el rendimiento dinámico del sistema al implementar un controlador tipo leaky integrator, mostrando una corrección eficaz bajo condiciones atmosféricas adversas. Las simulaciones, realizadas en OOPAO, están basadas en el esquema de óptica adaptativa monoconjugada planteado para el Telescopio Solar Europeo (EST).

Palabras clave: Implementación digital, Rechazo de perturbaciones (caso lineal), Regulación (caso lineal), Sistemas con retardos temporales, Sistemas invariantes en el tiempo.

Evaluation of Control and Reconstruction Strategies in Adaptive Optics

Abstract

The development of adaptive optics (AO) systems for next-generation telescopes demands control strategies capable of compensating for atmospheric distortions with high spatial and temporal precision. This work presents the study of an AO control loop, focusing on two components: the reconstruction process and the controller. First, the effect of modal truncation applied to the Moore-Penrose pseudoinverse used to compute the reconstruction matrix is analyzed. As a result, a suitable truncation parameter range ($\epsilon \approx 0.025\text{--}0.05$) that maximizes the Strehl ratio has been identified. In addition, the system's dynamic performance is assessed through the use of a leaky integrator controller, showing effective correction under adverse atmospheric conditions. The simulations, carried out in OOPAO, are based on the single-conjugate adaptive optics (SCAO) scheme proposed for the European Solar Telescope (EST).

Keywords: Digital implementation, Disturbance rejection (linear case), Regulation (linear case), Systems with time-delays, Time-invariant systems.

1. Introducción

La óptica adaptativa (AO, por sus siglas en inglés *Adaptive Optics*) es una tecnología clave en Astrofísica que permite corregir en tiempo real las distorsiones introducidas por la atmósfera terrestre sobre las ondas de luz procedentes de objetos astronómicos (Hampson et al., 2021). Estas

distorsiones, originadas por la turbulencia atmosférica, degradan sustancialmente la calidad de imagen, limitando la capacidad de los telescopios terrestres para alcanzar su resolución angular teórica.

La resolución angular de un telescopio mejora con el incremento de la apertura efectiva, directamente relacionada con el tamaño del espejo primario. Sin embargo, a medida que

*Autor para correspondencia: jgonzalc@ull.edu.es
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

dicho diámetro aumenta, el sistema óptico se vuelve más sensible a las aberraciones atmosféricas. En ausencia de un sistema de corrección de óptica adaptativa, la resolución de los grandes telescopios queda limitada por la turbulencia atmosférica. Por esta razón, una de las principales líneas de investigación y desarrollo de los nuevos grandes telescopios como GMT (Demers et al., 2024), ELT (Ciliegi et al., 2024) o TMT (Boyer et al., 2024), está centrada en el diseño de sistemas de óptica adaptativa que permitan alcanzar los límites de calidad óptica de estas infraestructuras.

En el ámbito de la astrofísica solar, el Telescopio Solar Europeo (*European Solar Telescope*, EST) incorporará uno de los sistemas de óptica adaptativa más complejos desarrollados hasta la fecha. El objetivo de este sistema es alcanzar el límite de difracción a 500nm sobre un campo de visión circular con un diámetro de 60" (Quintero Noda et al., 2022). Para su diseño y desarrollo, EST cuenta con un demostrador óptico a escala que permite validar diferentes estrategias de corrección (Feijóo et al., 2023). Los resultados obtenidos hasta la fecha han demostrado la viabilidad de diferentes esquemas de óptica adaptativa para EST (Gonzalez-Cava et al., 2022; Rodriguez-Linares et al., 2024).

En esencia, un sistema de óptica adaptativa se basa en un esquema de control en lazo cerrado. Para compensar la variación de fase de la luz provocada por la atmósfera, se introduce un espejo deformable capaz de modificar dinámicamente su superficie. La señal de actuación que se aplica al espejo es calculada por un controlador en tiempo real, a partir de la reconstrucción de la fase residual medida. Para ello, un sensor de frente de onda mide el error residual tras la compensación realizada por el espejo deformable. Este sistema se complica en el caso de EST, donde es necesario operar simultáneamente con varios espejos deformables y sensores de frente de onda para alcanzar el requisito de corrección propuesto (Femenía-Castella et al., 2022).

Para el adecuado diseño de la estrategia de control, es necesario caracterizar los componentes que conforman el lazo. Un elemento específico de este tipo de sistemas es el reconstructor. Éste permite convertir las medidas del sensor de frente de onda en comandos de actuación a aplicar al espejo deformable. Una matriz de reconstrucción mal condicionada introduce errores en la corrección conducentes a la amplificación del ruido del sensor, inestabilidades en el sistema o la limitación en la respuesta de corrección (Fernandez, 2024). Por ello, la correcta selección del tipo de reconstrucción y la selección de sus parámetros es esencial para asegurar el funcionamiento adecuado del sistema ante diferentes condiciones atmosféricas.

El diseño del controlador también resulta crucial para lograr una adecuada corrección dinámica. En los últimos años, el auge de técnicas basadas en inteligencia artificial ha derivado en la propuesta de sistemas de control basados en aprendizaje automático (Guo et al., 2022). También se han desarrollado estructuras de control basadas en LQG enfocadas en la compensación de vibraciones que afectan a este tipo de sistemas (Marquis et al., 2024). Sin embargo, una de las estructuras que mejor rendimiento ha desempeñado en pruebas en cielo es el leaky integrator (Gerard et al., 2021). Este tipo de controlador ofrece un compromiso entre simplicidad de implementación, robustez frente a ruido y

estabilidad dinámica. Además, se trata de una estructura eficiente para implementaciones en tiempo real.

El presente trabajo tiene como objetivo analizar el impacto del reconstructor y del controlador en el rendimiento de un lazo de control de óptica adaptativa. En primer lugar, se evalúa la influencia de la matriz de reconstrucción en la calidad óptica del sistema, con especial atención al efecto del truncamiento modal al emplear una reconstrucción basada en la pseudoinversa de Moore-Penrose. En segundo lugar, se estudia el comportamiento dinámico del sistema al implementar un controlador tipo leaky integrator, ampliamente utilizado en este tipo de sistemas.

Para llevar a cabo este estudio, se desarrollará una simulación numérica de un lazo de control completo de óptica adaptativa, implementado en el entorno OOPAO. El esquema óptico modelado se basa en la arquitectura de Single Conjugate Adaptive Optics (SCAO) propuesta para EST (Gonzalez-Cava et al., 2022).

Este artículo se estructura de la siguiente manera: la sección 2 describe los elementos fundamentales que componen un lazo de control para SCAO. La Sección 3 detalla la metodología empleada en este trabajo, incluyendo la definición de la matriz de reconstrucción y el análisis dinámico del lazo de control. La Sección 4 presenta los principales resultados obtenidos en simulación. La Sección 5 expone las principales conclusiones del estudio.

2. Lazo de control para SCAO

En términos generales, un lazo de control para SCAO puede representarse mediante el esquema de control de la Figura 1.

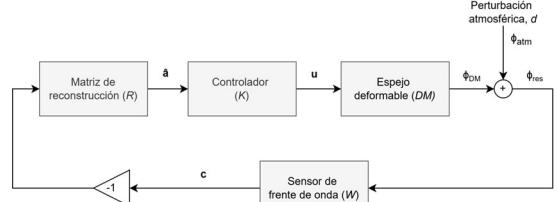


Figura 1. Diagrama de bloques para un sistema SCAO. Las señales c , \hat{a} y u representan los vectores de centroides, estimación de actuadores y señal de control, respectivamente. ϕ_{DM} , ϕ_{atm} y ϕ_{res} representan la fase inducida por el espejo, el frente de onda atmosférico y el frente de onda residual, respectivamente.

En este sistema, el elemento de actuación es un espejo deformable formado por n actuadores distribuidos a lo largo de su superficie. Por lo general, el ancho de banda de este tipo de espejos es superior a los rangos de frecuencia de corrección requeridos para el lazo de control, por lo que puede modelarse como una ganancia estática. El sensor de frente de onda es el elemento encargado de estimar el residuo de frente de onda tras la corrección. Aunque existen diferentes tecnologías, una de las más empleadas es el sensor de tipo Shack-Hartmann (Primot, 2003). Este sensor está conformado por un array de lentes dividido en m subaperturas que permiten el muestreo espacial del frente de onda incidente. En el caso de SCAO, estas microlentes están conjugadas ópticamente al plano de pupila de entrada del telescopio. El sensor procesa la imagen formada en cada subapertura (*spot*), y estima los desplazamientos (en píxeles) del spot en coordenadas x e y con respecto a una posición de referencia. Una de las formas más

comunes para el cálculo del centroide para una fuente puntual es el algoritmo de centro de gravedad (CoG). Esto da lugar a una señal, $\mathbf{c} \in \mathbb{R}^m$. Por lo general, el tiempo de integración del sensor puede aproximarse a una muestra temporal. Además, el tiempo de lectura y procesamiento para la obtención del centroide suele consumir otra muestra de tiempo. Por ello, desde el punto de vista dinámico, un sensor de frente de onda puede modelarse como un retardo puro de 2 muestras de tiempo.

Un elemento clave en este tipo de sistemas es la matriz de reconstrucción, $\mathbf{R} \in \mathbb{R}^{n \times m}$. Esta matriz permite estimar el comando a aplicar a cada actuador, $\hat{\mathbf{a}} \in \mathbb{R}^n$, para compensar la señal de error medida por el sensor, \mathbf{c} .

$$\hat{\mathbf{a}} = \mathbf{R} \mathbf{c} \quad (1)$$

La matriz \mathbf{R} puede calcularse a partir de la inversa de la matriz de interacción, $\mathbf{D} \in \mathbb{R}^{m \times n}$, definida como:

$$\mathbf{c} = \mathbf{D} \mathbf{a} \quad (2)$$

Es posible construir \mathbf{D} a partir de la medición del efecto de los actuadores en el sensor de frente de onda. Esta excitación puede llevarse a cabo actuador a actuador (corrección zonal) o mediante la aplicación de modos ópticos individuales (corrección modal). Nótese que \mathbf{D} no es una matriz cuadrada, por lo que para la obtención de \mathbf{R} se recurre al cálculo de la pseudoinversa, $\mathbf{R} = \mathbf{D}^\dagger$.

La perturbación atmosférica, \mathbf{d} , es la principal señal de entrada al lazo de control. Esta señal representa el desfase en el frente de onda introducido por la atmósfera terrestre, ϕ_{atm} . Nótese que la señal de referencia se asume nula. Esto obedece a la suposición de que $\mathbf{c} = 0$ en ausencia de perturbación atmosférica, y con el espejo deformable aplanado. Desde el punto de vista de control, por tanto, se aborda un problema de regulación. Finalmente, el controlador es el elemento encargado de generar el comando a aplicar al espejo deformable en cada iteración para la compensación dinámica.

3. Materiales y métodos

3.1. Selección de la matriz de reconstrucción

La matriz de reconstrucción, \mathbf{R} , permite estimar la actuación necesaria para compensar los errores de corrección medidos por el sensor de frente de onda. Para ello, se emplea la pseudoinversa de Moore-Penrose de la matriz \mathbf{D} , calculada mediante la descomposición de valores singulares (SVD). Esta descomposición se expresa como:

$$\mathbf{D} = \mathbf{U} \Sigma \mathbf{V}^T \quad (3)$$

donde $\mathbf{U} \in \mathbb{R}^{m \times m}$ y $\mathbf{V} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ son matrices ortogonales, y $\Sigma \in \mathbb{R}^{m \times n}$ es una matriz diagonal rectangular que contiene los valores singulares $\sigma_i \geq 0$ ordenados en orden descendente.

La pseudoinversa \mathbf{D}^\dagger se obtiene como:

$$\mathbf{D}^\dagger = \mathbf{V} \Sigma^\dagger \mathbf{U}^T \quad (4)$$

donde Σ^\dagger se obtiene invirtiendo los valores singulares y trasponiendo la matriz.

Para mejorar la robustez frente a ruido o modos mal condicionados, es habitual aplicar un truncamiento espectral. Para ello, es posible definir un umbral de corte, $\tau = \varepsilon \cdot \sigma_{max}$ donde ε es un parámetro que controla el truncamiento espectral, y σ_{max} es el mayor valor singular de \mathbf{D} . La pseudoinversa truncada de Σ resulta:

$$\Sigma_\varepsilon^\dagger = \text{diag} \left(\begin{cases} 1/\sigma_i & \text{si } \sigma_i > \tau \\ 0 & \text{si } \sigma_i \leq \tau \end{cases} \right) \quad (5)$$

La pseudoinversa truncada de \mathbf{D} puede calcularse como:

$$\mathbf{R}_\varepsilon = \mathbf{D}_\varepsilon^\dagger = \mathbf{V} \Sigma_\varepsilon^\dagger \mathbf{U}^T \quad (6)$$

En sistemas de óptica adaptativa, un valor de truncamiento bajo ($\varepsilon \approx 0$) puede incluir modos mal condicionados o dominados por el ruido, lo que degrada el proceso de corrección. Por otro lado, valores altos puede llevar a descartar modos útiles para la corrección.

3.2. Análisis del lazo de control

Una de las estrategias más adoptadas para sistemas de óptica activa es el uso del integrador con fuga o leaky integrator. Este controlador es una versión modificada del integrador digital, en el que se introduce un factor de fuga que trunca el crecimiento acumulativo del error de control. Sea $\mathbf{u}_k \in \mathbb{R}^n$ el vector de comandos aplicados al espejo deformable en el instante de tiempo k , la ley de control del leaky integrator puede expresarse como:

$$\mathbf{u}_k = (1 - \alpha) \circ \mathbf{u}_{k-1} + \mathbf{g} \circ \hat{\mathbf{a}}_k \quad (7)$$

donde \circ denota el producto de Hadamard, $\alpha \in \mathbb{R}^n$ es el parámetro de fuga (leak rate), $\mathbf{g} \in \mathbb{R}^n$ es la ganancia del integrador y $\hat{\mathbf{a}}_k = \mathbf{R} \cdot \mathbf{c}_k$. Esta generalización permite ajustar individualmente la respuesta de cada relación centroide-actuador para compensar no uniformidades detectadas en la respuesta de los actuadores. Por simplicidad, en este trabajo se considera la misma sintonización para los distintos canales de control:

$$\mathbf{u}_k = (1 - \alpha) \mathbf{u}_{k-1} + g \hat{\mathbf{a}}_k \quad (8)$$

donde $\alpha \in [0,1]$ y $g > 0$. Cuando $\alpha = 0$ se recupera el integrador clásico sin fuga. El efecto de α sobre la respuesta en frecuencia del controlador se muestra en la Figura 2.

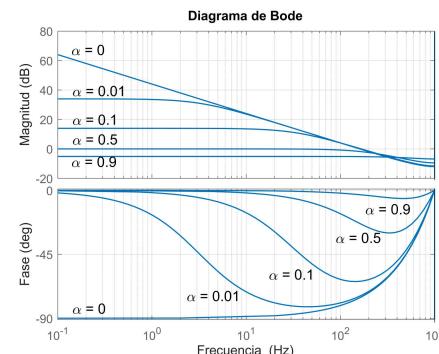


Figura 2. Variación de la respuesta en frecuencia de un controlador leaky integrator en función de α . Ganancia, $g = 0.5$.

Atendiendo a la naturaleza del problema de control, resulta de interés caracterizar la respuesta en frecuencia de la capacidad de rechazo de perturbación del sistema en lazo cerrado, $S(z)$. Sea $K(z)$ el controlador discreto empleado, $\mathbf{W}(z)$ el sensor de frente de onda, incluyendo un factor de retardo de dos muestras, y $A(z)$ la dinámica de los actuadores del espejo deformable, la función de rechazo del sistema es:

$$S(z) = (\mathbf{I} + \mathbf{W}(z) A(z) K(z) R_\varepsilon)^{-1} \mathbf{W}(z) \quad (9)$$

donde \mathbf{I} es la matriz identidad. Sea $\mathbf{W}(z) = \bar{\mathbf{W}}_{\phi c} \cdot z^{-2}$, con $\bar{\mathbf{W}}_{\phi c}$ representando la matriz de conversión de fase del frente de onda en pupila a desplazamiento de centroides (x, y) en el sensor de frente de onda, y asumiendo que el ancho de banda de los actuadores del espejo deformable es superior a la frecuencia de corrección requerida, se obtiene que:

$$S(z) = (\mathbf{I} + \bar{\mathbf{W}}_{\phi c} \cdot z^{-2} A K(z) R_\varepsilon)^{-1} \bar{\mathbf{W}}_{\phi s} \cdot z^{-2} \quad (10)$$

A partir de la definición de la matriz de interacción, puede asumirse que $D = \bar{\mathbf{W}}_{\phi c} A$. Considerando la perturbación atmosférica, d , medida por el sensor de frente de onda, $d' = \bar{\mathbf{W}}_{\phi c} d$, la función de rechazo, $S'(z)$ resulta:

$$S'(z) = (\mathbf{I} + D \cdot z^{-2} K(z) R_\varepsilon)^{-1} z^{-2} \quad (11)$$

Por simplicidad en el análisis, se asume que $D R_\varepsilon \approx \mathbf{I}$. Asumiendo un único controlador $K(z)$, la Figura 3 muestra la magnitud de $S'(z)$ para distintos valores de α .

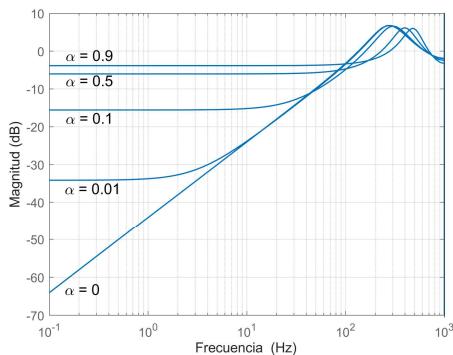


Figura 3. Magnitud de la curva de rechazo, $|S'|$, en función α . Ganancia, $g = 0.5$.

En este trabajo, se ha seleccionado un $\alpha = 0.2$ y $g = 0.4$ para asegurar la estabilidad y evitar la acumulación de ruido a baja frecuencia. Para esta sintonización, el ancho de banda del sistema se establece en torno a 400Hz ($\approx 1/5$ de la frecuencia de muestreo). Nótese que, pese a las mayores atenuaciones esperadas a bajas frecuencias con el aumento de α , la experiencia previa en estos sistemas indica que la corrección se ve limitada por los efectos de interacción entre los elementos de actuación y sensado.

3.3. Simulación del sistema de óptica adaptativa

Para modelar y caracterizar el comportamiento del sistema de óptica adaptativa desarrollado en este trabajo, se ha utilizado OOPAO (Heritier et al., 2023). Este simulador está basado en una arquitectura orientada a objetos, lo que facilita

la configuración de los distintos elementos involucrados en el lazo de óptica adaptativa, así como su conexión para la definición del esquema óptico a simular.

El lazo de control propuesto en este trabajo ha sido configurado en OOPAO basado en las principales características del sistema de óptica adaptativa para EST:

- Atmósfera: El parámetro de Fried, r_0 , permite caracterizar el grado de distorsión espacial del frente de onda. Se propone una configuración de 6 capas atmosféricas ubicadas a diferentes alturas. Cada capa está afectada por una dirección y velocidad de viento.

- Objeto de ciencia: se considera una fuente puntual con longitud de onda $\lambda = 500\text{nm}$ situada en el eje óptico. Se asume que el propio objeto de ciencia se emplea como referencia para la corrección.

- Telescopio: se emplean características compatibles con el diseño de EST, incluyendo el diámetro del espejo primario (4.2m), el diámetro de obscuración (0.8m) o el campo de visión ($60''$).

- Sensor de frente de onda: se emplea un sensor tipo Shack-Hartmann con 50x50 subaperturas. Para el cálculo del centroide, se emplea el algoritmo de CoG.

- Espejo deformable: se emplea un espejo con actuadores dispuestos en una cuadrícula uniforme sobre la superficie del espejo compatible con la configuración de Fried. Cada actuador se modela con una función de influencia gaussiana y acoplamiento mecánico del 40%.

- Matriz de interacción y reconstrucción: se propone la medición de la matriz mediante actuación individual de cada actuador y registro de la variación de los centroides en el sensor de frente de onda.

OOPAO implementa la dinámica temporal del lazo de óptica adaptativa mediante un bucle iterativo, en el que cada iteración representa un intervalo temporal fijo. En este caso, se emplea una frecuencia de muestreo de 2KHz. El simulador, además, permite extraer información relativa al vector de centroides medidos por el sensor de frente de onda, la señal de comando aplicada a cada actuador del espejo deformable, y diversos indicadores de rendimiento relativos a la calidad de la corrección obtenida.

3.4. Escenarios de análisis

En primer lugar, en este trabajo se pretende caracterizar el impacto de la matriz de reconstrucción en el rendimiento de la estrategia de corrección de frente de onda. Para ello, se evalúan distintas matrices de reconstrucción $\mathcal{R} = \{R_\varepsilon | \varepsilon \in \{0.01, 0.025, 0.05, 0.1, 0.25, 0.5\}\}$. Para el análisis, se propone la generación de 10 pantallas de fase turbulenta con la misma estructura: número de capas, distribución y perfil de viento. Para asegurar la reproducibilidad en los análisis, se fijan las semillas de cada pantalla de fase para la generación aleatoria de la perturbación. Además, para no incluir el efecto de la componente dinámica en esta prueba, se considera que la turbulencia es estática a lo largo de la simulación.

En segundo lugar, se analiza la calidad de corrección dinámica del sistema en lazo cerrado al emplear el controlador tipo leaky integrator propuesto. Para esta prueba, se hará uso de la matriz de reconstrucción con mejor rendimiento evaluada en la prueba anterior. El tiempo de simulación evaluado será de 10 segundos (20.000 iteraciones).

La calidad de la corrección está fuertemente ligada a la intensidad de la perturbación atmosférica. Para ambas pruebas propuestas se considerarán dos escenarios de perturbación atmosférica: i) escenario con condición atmosférica buena ($r_0 = 22$ cm), y ii) escenario con condición atmosférica adversa ($r_0 = 10$ cm).

Para evaluar la calidad de corrección alcanzada en cada prueba, se emplean dos métricas: el Strehl Ratio (SR) y el error de frente de onda expresado como valor cuadrático medio. El SR se define como la relación entre la intensidad de pico de la función de dispersión de punto (PSF) del sistema corregido y la función del sistema libre de aberraciones limitado por difracción. Por ello, $\text{SR} \in [0, 1]$, con valores próximos a 1 indicando una PSF próxima a la ideal. En este estudio, se propone la aproximación de Maréchal para el cálculo del Strehl. Por su parte, el error de frente de onda (WFE) cuantifica la energía de las aberraciones residuales en el dominio del plano pupilar. Esta métrica cuantifica la desviación del frente de onda residual frente a un frente de onda plano, expresado en nm.

4. Resultados

En esta sección se presentan los resultados de simulación obtenidos en OOPAO para cada una de las pruebas propuestas. En primer lugar, se ha evaluado el rendimiento de la matriz de reconstrucción en función del parámetro de truncamiento empleado. La Figura 3 muestra un ejemplo de la imagen de ciencia limitada por difracción (sin atmósfera) y bajo turbulencia atmosférica con parámetros $r_0 = 22$ cm y $r_0 = 10$ cm, respectivamente.

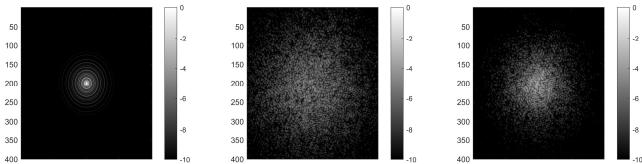


Figura 4. Imagen en cámara de ciencia de un objeto puntual sin perturbación atmosférica (izquierda), $r_0 = 10$ cm (centro) y $r_0 = 22$ cm (derecha). La intensidad se representa en escala logarítmica y ha sido normalizada con respecto al valor máximo de la imagen sin perturbación.

Los resultados de la corrección en régimen estacionario para las diferentes matrices de reconstrucción evaluadas se muestran en la Tabla 1. En ambos escenarios de perturbación, los resultados muestran que el mejor rendimiento se obtiene con $\varepsilon=0.025$ y $\varepsilon=0.05$. Al reducir este valor, la calidad de la corrección empeora. Esto se debe a que el truncamiento es insuficiente, incluyendo en la matriz modos mal sensados. Al incrementar el valor, se observa un efecto de sobretruncamiento, lo que induce el filtrado de modos relevantes para la reconstrucción. La Figura 5 muestra un ejemplo de la imagen corregida al emplear una matriz de reconstrucción con $\varepsilon=0.025$.

En la segunda prueba, se ha evaluado el rendimiento del controlador leaky integrator propuesto en este trabajo para condiciones de perturbación atmosférica de $r_0 = 10$ cm y $r_0 = 22$ cm. Para ello, se han ejecutado dos simulaciones de 20000 iteraciones cada una, equivalente a un tiempo de simulación

de 10s. En ambos casos, se ha empleado la matriz de reconstrucción con $\varepsilon=0.025$.

Tabla 1. Resultados de la corrección en función del truncamiento de la matriz de reconstrucción. Resultados expresados como Media (std).

	ε	SR	WFE RMS [nm]
$r_0 = 10\text{cm}$	0.01	0.47 (0.085)	69.22 (8.71)
	0.025	0.66 (0.052)	51.35 (4.89)
	0.05	0.65 (0.058)	51.85 (5.40)
	0.10	0.26 (0.083)	613.13 (443.84)
	0.25	$9.3 \cdot 10^{-11}$ ($2.2 \cdot 10^{-10}$)	827.14 (440.82)
	0.50	$4.27 \cdot 10^{-19}$ ($1.5 \cdot 10^{-21}$)	905.40 (419.58)
$r_0 = 22\text{cm}$	0.01	0.81 (0.037)	36.61 (3.95)
	0.025	0.89 (0.021)	27.38 (2.62)
	0.05	0.88 (0.025)	27.60 (3.07)
	0.10	0.095 (0.21)	317.86 (230.17)
	0.25	$6.66 \cdot 10^{-4}$ (0.0013)	428.90 (228.42)
	0.50	$4.10 \cdot 10^{-6}$ ($7.18 \cdot 10^{-6}$)	469.32 (217.47)

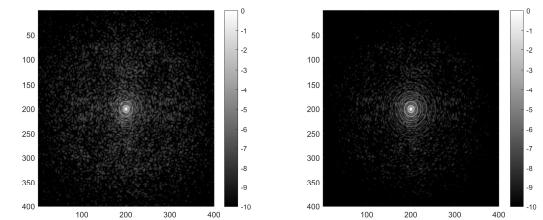


Figura 5. Imagen en cámara de ciencia tras la corrección mediante matriz de reconstrucción, para condiciones atmosféricas con $r_0 = 10$ cm (izquierda) y $r_0 = 22$ cm (derecha). La intensidad se representa en escala logarítmica y ha sido normalizada con respecto al valor máximo de la imagen sin perturbación.

La Figura 6 muestra la evolución temporal del error de frente de onda. Se observa que, en ambos escenarios, el controlador es capaz de compensar el efecto dinámico de la perturbación atmosférica. A lo largo de la simulación se alcanza un error de frente de onda promedio de 69.74 nm RMS ($\sigma = 7.41$ nm RMS) y 39.71 nm RMS ($\sigma = 3.74$ nm RMS) para $r_0 = 10$ cm y $r_0 = 22$ cm, respectivamente

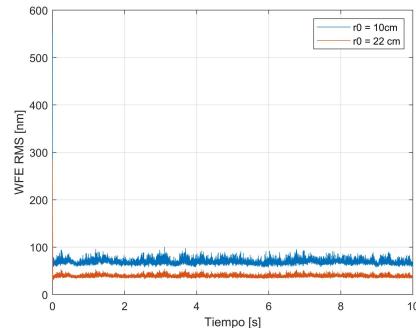


Figura 6. Evolución del error de frente de onda en lazo cerrado para condiciones atmosféricas de $r_0 = 10$ cm y $r_0 = 22$ cm.

La Figura 7 muestra la evolución de la calidad atmosférica medida en SR. Al igual que con el error de frente de onda, se observa que el controlador propuesto alcanza rendimientos aceptables, logrando un SR promedio de 0.47 ($\sigma = 0.055$) y 0.78 ($\sigma = 0.031$) para $r_0 = 10$ cm y $r_0 = 22$ cm, respectivamente. El peor rendimiento para $r_0 = 10$ cm responde a la mayor intensidad de perturbación atmosférica, lo que se traduce en un mayor contenido de altas frecuencias espaciales. Esto dificulta la medida y corrección del frente de onda, lo que redunda directamente en la calidad óptica alcanzada.

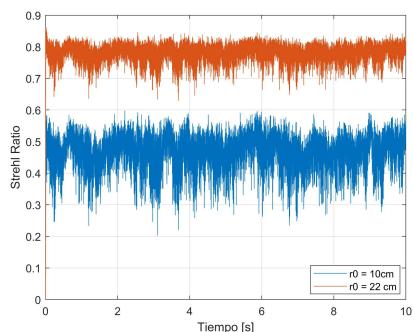


Figura 7. Evolución del SR en lazo cerrado para condiciones atmosféricas de $r_0 = 10\text{cm}$ y $r_0 = 22\text{cm}$.

5. Conclusiones

En este trabajo se ha analizado el impacto de dos elementos clave en el rendimiento de un lazo de control de óptica adaptativa: la matriz de reconstrucción y el controlador. A través de simulaciones realizadas en el entorno OOPAO, se ha demostrado que la elección del parámetro de truncamiento en la reconstrucción mediante pseudoinversa de Moore-Penrose influye de forma crítica en la calidad óptica alcanzada. El mejor compromiso se ha encontrado en torno a $\epsilon = 0.025\text{--}0.05$, obteniéndose los mayores valores de Strehl ratio y los menores errores RMS del frente de onda.

En segundo lugar, se ha evaluado el comportamiento dinámico del sistema al emplear un controlador tipo leaky integrator, mostrando que esta estrategia permite mantener una respuesta estable y eficaz frente a perturbaciones atmosféricas de distinta intensidad. Los trabajos futuros deberán analizar y validar estrategias de control adaptadas a las características de este tipo de sistemas, prestando especial atención a los efectos de las interacciones.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la Convocatoria de Proyectos dirigidos por noveles investigadores perteneciente al Plan propio de incentivación de la actividad investigadora del Vicerrectorado de Investigación y Transferencia de la Universidad de La Laguna 2024. Financiación otorgada por la Consejería de Economía, Conocimiento y Empleo del Gobierno de Canarias, Agencia Canaria de Investigación, Innovación y Sociedad de la Información.

Referencias

- Boyer, C., Wang, L., Trubey, M., Irarrazaval, B., Miles, J., Vogiatzis, K., Véran, J.-P., & Atwood, J. (2024). Progress report on the TMT Adaptive Optics Facility. In K. J. Jackson, D. Schmidt, & E. Vernet (Eds.), *Adaptive Optics Systems IX* (Vol. 13097, p. 130971Z). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.3019281>
- Ciliegi, P., Agapito, G., Aliverti, M., Annibali, F., Aridacono, C., Azzaroli, N., Balestra, A., Baronchelli, I., Ballone, A., Baruffolo, A., Battaini, F., Benedetti, S., Bergomi, M., Bianco, A., Bonaglia, M., Briguglio, R., Busoni, L., Cantiello, M., Capasso, G., ... Xompero, M. (2024). MORFEO at ELT: the adaptive optics module for ELT. In K. J. Jackson, D. Schmidt, & E. Vernet (Eds.), *Adaptive Optics Systems IX* (Vol. 13097, p. 1309722). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.3019058>
- Demers, R., Quiros-Pacheco, F., Schurter, P., Xin, B., Haddad, J. P., Molgo, J., Schoenell, W., Conan, R., Romano, R., Bouchez, A., van Dam, M. A., Catropa, D., Kansky, J., McLeod, B., McMuldroch, S., Podgorski, W., Witinski, M., Close, L., Gasho, V., ... Nissen, J. (2024). Adaptive optics development at the Giant Magellan Telescope: recent progress. In K. J. Jackson, D. Schmidt, & E. Vernet (Eds.), *Adaptive Optics Systems IX* (Vol. 13097, p. 1309723). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.3020271>
- Feijoo, N., Rodríguez, N., Montoya, L., González-Cava, J. M., Martín Hernando, Y., Chulani, H., Núñez Cagigal, M., González, F., Quintero Nehrkorn, J., & Hernández-Delgado, Á. (2023, June). MCAO testbed for European Solar Telescope (EST): first laboratory results for SCAO and GLAO configurations. *Adaptive Optics for Extremely Large Telescopes 7th Edition*. <https://doi.org/10.13009/AO4ELT7-2023-098>
- Femenia-Castella, B., Cagigal, M. N., Cabrera, M. B., Belio-Asin, M., Bienes, J., González, S. B., Collados, M., Córzar-Castellano, J., Chulani, H., Amoedo, N. F., Cava, J. M. G., Hernando, Y. M., Mató, A., Montilla, I., Montoya, L. M., Padilla, C., Nehrkorn, J. Q., Noda, C. Q., Delgado, H. R., ... Reyes, N. V. (2022). Adaptive Optics at the European Solar Telescope: status and future developments. In L. Schreiber, D. Schmidt, & E. Vernet (Eds.), *Adaptive Optics Systems VIII* (Vol. 12185, p. 121851Z). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.2629516>
- Fernandez, E. J. (2024). *Handbook of Adaptive Optics*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003163671>
- Gerard, B. L., Dillon, D., Cetre, S., Jensen-Clem, R., Yuzvinsky, T. D., & Schmidt, H. (2021). First experimental results of the fast atmospheric self-coherent camera technique on the Santa Cruz extreme adaptive optics laboratory testbed: demonstration of high speed focal plane wavefront control of residual atmospheric speckles. In S. B. Shaklan & G. J. Ruane (Eds.), *Techniques and Instrumentation for Detection of Exoplanets X* (Vol. 11823, p. 118231H). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.2599556>
- Gonzalez-Cava, J. M., Chulani, H., Martín, Y., Feijoo, N., Montoya, L., Delgado, H. R., Quintero, J., González, F., Hernández, Á., Basden, A., Gendron, E., & Cagigal, M. N. (2022). Laboratory results of SCAO: getting ready for the EST MCAO. In L. Schreiber, D. Schmidt, & E. Vernet (Eds.), *Adaptive Optics Systems VIII* (Vol. 12185, p. 1218542). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.2628242>
- Guo, Y., Zhong, L., Min, L., Wang, J., Wu, Y., Chen, K., Wei, K., & Rao, C. (2022). Adaptive optics based on machine learning: a review. *Opto-Electronic Advances*, 5(7), 200082–200082. <https://doi.org/10.29026/oea.2022.200082>
- Hampson, K. M., Turcotte, R., Miller, D. T., Kurokawa, K., Males, J. R., Ji, N., & Booth, M. J. (2021). Adaptive optics for high-resolution imaging. *Nature Reviews Methods Primers*, 1(1), 68. <https://doi.org/10.1038/s43586-021-00066-7>
- Heritier, C. T., Verinaud, C., & Correia, C. M. (2023, June). OOPAO: Object Oriented Python Adaptive Optics. *Adaptive Optics for Extremely Large Telescopes 7th Edition*. <https://doi.org/10.13009/AO4ELT7-2023-052>
- Marquis, L., Raynaud, H.-F. G., Galland, N., De La Rosa, J. M., Montilla García, I., Tubío, Ó., Reyes García-Talavera, M., Lombardi, G., Huertas Lopez, M., Reverte, D., & Kulcsár, C. (2024). First on-sky tests of LQG control for a 10m-class telescope: prelude on the Gran Telescopio Canarias adaptive optics system. In D. Schmidt, E. Vernet, & K. J. Jackson (Eds.), *Adaptive Optics Systems IX* (p. 262). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.3020099>
- Primot, J. (2003). Theoretical description of Shack-Hartmann wave-front sensor. *Optics Communications*, 222(1–6), 81–92. [https://doi.org/10.1016/S0030-4018\(03\)01565-7](https://doi.org/10.1016/S0030-4018(03)01565-7)
- Quintero Noda, C., Schlichenmaier, R., Bellot Rubio, L. R., Löfdahl, M. G., Khomenko, E., Jurčák, J., Leenaarts, J., Kuckein, C., González Manrique, S. J., Gunár, S., Nelson, C. J., de la Cruz Rodríguez, J., Tziotziou, K., Tsiproula, G., Aulanier, G., Aboudarham, J., Allegri, D., Alsina Ballester, E., Amans, J. P., ... Collados, M. (2022). The European Solar Telescope. *Astronomy & Astrophysics*, 666, A21. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202243867>
- Rodríguez-Linares, N., Feijoo-Amoedo, N., Montoya, L., Martín, Y., Chulani, H., Núñez-Cagigal, M., González-Cava, J. M., & Méndez-Pérez, J. A. (2024). Contrast optimization in wide-field AO. In K. J. Jackson, D. Schmidt, & E. Vernet (Eds.), *Adaptive Optics Systems IX* (Vol. 13097, p. 1309770). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.3018299>