

2016

MODELADO Y CONTROL DE SISTEMA DE ÓPTICA ADAPTATIVA SUJETO A VIBRACIONES

GARCÉS ALMONACID, JAVIER ANDRÉS

<http://hdl.handle.net/11673/23364>

Repositorio Digital USM, UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA

**MODELADO Y CONTROL DE SISTEMA DE
ÓPTICA ADAPTATIVA SUJETO A VIBRACIONES**

Tesis de Grado presentada por

Javier Andrés Garcés Almonacid

como requisito parcial para optar al título de

Ingeniero Civil Electrónico

y al grado de

Magíster en Ciencias de la Ingeniería Electrónica

Profesor Guía

Dr. Juan Yuz Eissmann

Profesor Co-guía

Dr. Pedro Escárate Monetta

Valparaíso, 2016.

TÍTULO DE LA TESIS:

MODELADO Y CONTROL DE SISTEMA DE ÓPTICA ADAPTATIVA SUJETO A VIBRACIONES

AUTOR:

Javier Andrés Garcés Almonacid

TRABAJO DE TESIS, presentado en cumplimiento parcial de los requisitos para el título de Ingeniero Civil Electrónico y el grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería Electrónica de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Dr. Juan Yuz E.

Dr. Pedro Escárate M.

Dr. Andrés Guesalaga M.

Valparaíso, Julio de 2016.

*Dedicado a mi familia
por el amor infinito
el respeto constante
y el apoyo incondicional.*

CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS	III
RESUMEN	VII
ABSTRACT	IX
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Estado del Arte	2
1.2. Identificación de Problemas	3
1.3. Contribución de Tesis	3
1.4. Estructura del Documento	4
2. INSTRUMENTACIÓN ASTRONÓMICA	5
2.1. Telescopios para Observación Astronómica	5
2.1.1. Telescopio Ideal	7
2.1.2. Estructura y Diseño del Telescopio	7
2.1.3. Óptica Activa	11
2.2. <i>Seeing</i> Atmosférico	12
2.2.1. Turbulencia Atmosférica	12
2.2.2. Medición del <i>Seeing</i>	13
2.2.3. Dispersión Atmosférica	13
2.3. Óptica Adaptativa	14
2.3.1. Estrellas Guía	15
2.3.2. Sensores de Frente de Onda	16
2.3.3. Espejos Deformables	17
2.3.4. Descomposición en Modos	18
3. SISTEMA DE ÓPTICA ADAPTATIVA MAGAO	19
3.1. Instrumentación en MagAO	20
3.1.1. Unidad de Instrumentos de MagAO: W-Unit	20
3.2. Operación de MagAO	22
3.3. Resultados de MagAO en Operación	23

4. VIBRACIONES EN MAGAO	25
4.1. Datos Capturados	25
4.1.1. Sesión de Observación	25
4.1.2. Tests de Captura	27
4.2. Densidades Espectrales de Potencia	29
4.2.1. Normalización de PSDs	30
4.3. Vibraciones en MagAO	33
4.3.1. PSD de Sesión de Observación 2014a	34
4.3.2. PSD de Sesión de Observación 2014b	36
4.3.3. Optimización de Ganancia de Lazo Cerrado	37
4.3.4. Identificación de Fuentes de Resonancia	39
4.4. Resumen del Capítulo	45
5. MODELADO DE LAZO DE ÓPTICA ADAPTATIVA	47
5.1. Modelado de un Sistema de Óptica Adaptativa	47
5.1.1. Estrategia Directa	49
5.1.2. Estrategia de Amplitudes Modales	50
5.1.3. Ganancia del Controlador	50
5.1.4. Modelado de Turbulencia y Vibraciones	52
5.2. Modelo Lineal para MagAO	53
5.2.1. Datos de Optimización de Ganancia	54
5.2.2. Elección de Retardo del Lazo	56
5.3. Modelo Lineal para Fase Incidente	58
5.3.1. Estimación de PSD de Fase Incidente	58
5.3.2. Modelos AR2 para Fase Incidente	60
5.4. Resumen del Capítulo	62
6. CONTROL DE LAZO DE ÓPTICA ADAPTATIVA	63
6.1. Control LQG para MagAO	64
6.1.1. Modelo en Variables de Estado para MagAO	64
6.1.2. Estimación de Estado: Filtro de Kalman	65
6.1.3. Ley de Control: Minimización de Varianza	66
6.1.4. Obtención de Fase Incidente en el Tiempo	66
6.2. Simulación y Resultados	68
6.2.1. Sistema ante Vibraciones Inherentes	68
6.2.2. Sistema ante Vibraciones Adicionales	71
6.3. Resumen del Capítulo	73
7. CONCLUSIONES	75
7.1. Trabajo Futuro	76
REFERENCIAS	77

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1. Modelo 3D de un telescopio.	6
2.2. Fotografía del Observatorio Las Campanas.	6
2.3. Disco de Airy	7
2.4. Discos de Airy de dos cuerpos celestes.	8
2.5. Diagrama del recorrido de la luz a través de telescopios de distinto diseño.	8
2.6. Diagramas de monturas para un telescopio.	9
2.7. Estructura del Espejo Primario	10
2.8. Diagrama de sistema de óptica activa.	11
2.9. Efecto de la atmósfera sobre los rayos de luz de un cuerpo celeste.	12
2.10. Ejemplo de distorsión atmosférica	14
2.11. Ejemplo de mejoramiento de imagen científica usando óptica adaptativa.	15
2.12. Esquema de un sistema estándar de óptica adaptativa clásico.	15
2.13. Fotografía del observatorio W.M.Keck (Mauna Kea, Hawaii), usando estrellas guía láser.	16
2.14. Diagrama de funcionamiento de WFS Shack-Hartmann.	17
2.15. Diagrama de funcionamiento de WFS piramidal.	17
2.16. Diagramas de espejos deformables.	17
2.17. Diagramas de los primeros polinomios de Zernike.	18
3.1. Diagrama del instrumento MagAO.	20
3.2. Diagrama del contenido de la W-Unit	21
3.3. Imágenes de MagAO de estrella binaria θ^1 Orionis C.	23
3.4. Imágenes de MagAO de exoplaneta β Pic b.	24
3.5. Imágenes de objetos de masa planetaria capturados por la cámara Clio2.	24
4.1. Fotografía de proceso de montaje de cámara infrarroja Clio2.	26
4.2. Fotografías de puesto de trabajo en Telescopio Clay.	26
4.3. Varianzas de sets de datos temporales CCD y WFS.	27
4.4. Comparación de PSDs obtenidas usando FFT y usando método de Welch.	30
4.5. Datos WFS en tiempo, y PSD obtenida. Test 1.	31
4.6. PSDs medidos para datos CCD.	31

4.7. PSDs medidos para datos CCD y datos WFS, empleando estrategia previa de normalización.	32
4.8. PSDs medidos para datos CCD y datos WFS, empleando estrategia nueva de normalización.	33
4.9. PSDs de datos CCD y WFS, sesión 2014a, obtenidas por el Equipo MagAO.	34
4.10. PSDs de datos CCD y WFS capturados durante sesión 2014a, normalización previa.	35
4.11. PSDs de datos CCD y WFS capturados durante sesión 2014a, nueva normalización.	35
4.12. PSDs de datos CCD y WFS capturados durante sesión 2014b.	36
4.13. PSDs de datos WFS, Test 5. Identificación de vibraciones inherentes.	37
4.14. PSDs de test previo y posterior a la reoptimización de la ganancia a lazo cerrado.	38
4.15. Razón entre PSDs de tests con ganancia optimizada y tests con ganancia previa.	38
4.16. PSDs normalizadas de los modos tip/tilt de datos WFS, adquiridos durante tests 5 a 10.	40
4.17. Identificación de vibraciones causadas por Primary Fans, a través de cociente entre PSDs de tests 6 y 5.	41
4.18. Vibraciones causadas por Primary Fans en PSDs de Eje Y.	41
4.19. Identificación de vibraciones causadas por Primary Pump, a través de cociente entre PSDs de tests 7 y 6.	41
4.20. Vibraciones causadas por Primary Pump en PSDs de Eje X.	42
4.21. Vibraciones causadas por Primary Pump en PSDs de Eje Y.	42
4.22. Identificación de vibraciones causadas por Louvers, a través de cociente entre PSDs de tests 8 y 7.	43
4.23. Vibraciones causadas por Louvers en PSDs de Eje X.	43
4.24. Vibraciones causadas por Louvers en PSDs de Eje Y.	43
4.25. Identificación de vibraciones causadas por VisAO Fans, a través de cociente entre PSDs de tests 9 y 5.	44
4.26. Identificación de vibraciones causadas por Bayside Stages, a través de cociente entre PSDs de tests 10 y 5.	44
5.1. Diagrama de bloque Sensor de Frente de Onda	48
5.2. Diagrama de bloque Espejo Deformable	48
5.3. Diagrama de bloque Controlador	48
5.4. Diagrama de bloque de sistema de AO.	48
5.5. Diagrama de bloque de sistema de AO, estrategia MIMO.	49
5.6. Diagrama de bloque de sistema de AO, estrategia SISO.	51
5.7. Diagramas de bloques, generación de fases φ^{tur} y $\varphi^{vib,i}$.	52
5.8. Proceso de obtención de modelos lineales para lazo de control y fase incidente.	53
5.9. Diagrama de bloque de sistema de AO, base para diseño de modelo para MagAO.	54
5.10. Gráfico comparativo para proceso de modelado a partir de optimización de ganancia, para $d_m + d_c = 2$.	56

5.11. Gráfico comparativo para proceso de modelado a partir de optimización de ganancia, para $d_m + d_c = 3$.	57
5.12. Solución para H_{opt} que minimiza el error cuadrático, para $d_m + d_c = 3$.	57
5.13. Diagrama de bloques de modelo lineal para sistema MagAO.	58
5.14. PSDs de datos de salida y de componente del ruido de medición en datos de salida.	59
5.15. PSDs de datos de salida y de fase incidente.	60
5.16. Identificación de peaks vibratorios en la PSD de la fase incidente.	60
5.17. PSDs de fase incidente y de modelos AR2 resonantes para fases vibratorias.	61
5.18. PSDs de fase incidente y de modelo AR2 para fase turbulenta.	61
5.19. PSDs de la fase incidente y de modelo para la fase incidente basado en la suma de modelos AR2.	62
6.1. PSDs de datos de salida y de interpolaciones de los datos, al triple de su frecuencia de muestreo.	67
6.2. Proceso de implementación de estrategias de control en simulación.	68
6.3. PSDs de salida real y salida por simulación, bajo control integrativo. Datos de Test 5.	69
6.4. PSDs de salida real y salida por simulación, bajo control LQG. Datos de Test 5.	69
6.5. Mitigación de peaks de vibraciones inherentes en PSDs de datos de salida, por implementación de control LQG. Simulación de modelo lineal de sistema MagAO, datos de Test 5.	70
6.6. PSDs de salida real y salida por simulación, bajo control integrativo. Datos de Test 8.	71
6.7. PSDs de salida real y salida por simulación, bajo control LQG. Datos de Test 8.	72
6.8. Identificación de peaks de vibraciones adicionales en PSDs de datos de salida. Simulación de modelo lineal de sistema MagAO, datos de Test 8.	72
6.9. Mitigación de peaks de vibraciones inherentes en PSDs de datos de salida. Simulación de modelo lineal de sistema MagAO, datos de Test 8.	73

RESUMEN

La tecnología de la Óptica Adaptativa, presente en diversas aplicaciones ópticas, es un componente elemental en los sistemas astronómicos terrestres modernos. Ésta permite corregir las aberraciones inducidas por la turbulencia atmosférica sobre el haz de luz proveniente de un cuerpo celeste. Así, es posible mejorar la resolución de las imágenes científicas.

El objeto de estudio de la presente Tesis es el sistema MagAO (6.5m Magellan Telescope Adaptive Optics), quien dota de óptica adaptativa al Telescopio Clay del Observatorio Las Campanas. Desafortunadamente, la información obtenida por sistemas de óptica adaptativa como MagAO no sólo es alterada por la turbulencia atmosférica, sino también por vibraciones inherentes a los sistemas y vibraciones adicionales causadas por elementos de la instrumentación.

Actualmente, la influencia de las vibraciones en la imagen científica obtenida por MagAO es pequeña y suele ser despreciada. Sin embargo, en proyectos futuros de mayor envergadura, será fundamental identificar estas vibraciones, su naturaleza, su magnitud, y su mitigación.

En esta Tesis, se obtienen densidades espectrales de potencia a partir de datos capturados durante sesiones de observación astronómica, para conocer cómo el sistema MagAO se ve afectado por vibraciones. Los resultados de este análisis permiten identificar y medir la influencia de los elementos del sistema en el funcionamiento de MagAO.

El análisis espectral de los datos capturados permite, además, la obtención de modelos matemáticos para describir el sistema y las vibraciones observadas. Para este proceso, se usa un esquema estándar de lazo de óptica adaptativa, tomando en cuenta las perturbaciones generadas por turbulencia y vibraciones, para obtener un modelo lineal para MagAO.

Finalmente, el modelo obtenido permite proponer mejoras en el desempeño del lazo de óptica adaptativa a través del diseño de alternativas de control, obteniendo y comparando resultados mediante simulaciones.

Palabras Clave:

Óptica adaptativa, instrumentación astronómica, vibraciones, modelado, control.

ABSTRACT

The Adaptive Optics technology, implemented in different optical applications, is an elementary component in modern ground-based astronomical systems. It provides correction of aberrations induced by atmospheric turbulence on the beam of light from a celestial body. Thus, it is possible to improve the resolution of scientific images.

The object of study of this Thesis is the MagAO system (6.5m Magellan Telescope Adaptive Optics), implemented on the Clay Telescope, located at Las Campanas Observatory. Unfortunately, the data obtained by adaptive optics systems, such as MagAO, is altered not only by atmospheric turbulence, but also by inherent vibrations of the system and additional vibrations caused by instrumentation elements.

Currently, the influence of vibrations in the images obtained by MagAO is small and is usually neglected. However, in future astronomical projects, it is essential to identify these vibrations, its nature, magnitude, and mitigation.

In this Thesis, power spectral densities are obtained from data captured during astronomical observation sessions, to learn how the MagAO system is affected by vibrations. This analysis allows to identify and measure the influence of the system instruments operating in MagAO.

Based on the spectral analysis of captured data, mathematical models are obtained, to describe the system and its vibrations. For this process, a standard AO loop is used, taking into account perturbations induced by turbulence and vibrations, to obtain a linear model for MagAO.

Finally, the model obtained allows us to propose improvements for the AO loop, through the design of control alternatives. The system performance for these controllers is analysed through simulations.

Keywords:

Adaptive optics, astronomical instrumentation, vibrations, modeling, control.

INTRODUCCIÓN

La Astronomía es la ciencia del estudio de los cuerpos celestes y los procesos del universo. Se trata de una de las ciencias más antiguas de la humanidad, y que hoy en día emplea las más modernas tecnologías y desarrollos en instrumentación para un estudio siempre creciente de los fenómenos físicos que ocurren fuera de nuestra atmósfera.

Las condiciones climáticas y geográficas del norte de Chile han convertido al país en la capital mundial de la astronomía, poseyendo el 40 % de la observación astronómica del mundo, y siendo el destino geográfico de los proyectos astronómicos más ambiciosos actualmente. De esta forma, se estima que para la década del 2020, Chile concentrará el 70 % de la observación astronómica mundial.

Los centros astronómicos están siempre aprovechando y desarrollando nuevas tecnologías que contribuyan al progreso de la ciencia astronómica.

La óptica adaptativa (Adaptive Optics, AO) es la solución tecnológica a tratar en el presente trabajo de Tesis. Ésta responde a la necesidad de mitigar el *seeing* atmosférico, es decir, las perturbaciones en el haz de luz proveniente de un cuerpo celeste, inducidas por los efectos de la turbulencia atmosférica: corrientes de viento y heterogeneidad de temperatura en la atmósfera.

El sistema de óptica adaptativa detecta la aberración que la atmósfera induce en el haz de luz a través del análisis de la distorsión en una estrella guía. Mediante sensores de frente de onda y el lazo de control asociado, es posible reconstruir la perturbación detectada, corrigiéndola usando un espejo deformable que invierte la distorsión. Esta tecnología está en rápido desarrollo, capacitando a los centros astronómicos para obtener imágenes de alta calidad, a un nivel de resolución comparable al de estaciones espaciales.

Un sistema real de óptica adaptativa, y el objeto de estudio en la presente Tesis, es el sistema MagAO (6.5m Magellan Telescope Adaptive Optics) [1]. Éste se encuentra implementado en el telescopio Clay, uno de los dos telescopios Magellan del observatorio Las Campanas (LCO). MagAO se destaca por ser el primer sistema de óptica adaptativa en el hemisferio sur basado en un espejo secundario adaptativo (ASM-based AO system), y ha capacitado al telescopio Clay para proveer imágenes de alta calidad limitadas por difracción (0.6 a 1.0 micron) alcanzando resoluciones de hasta 20 miliarcosegundos [2].

Sin embargo, existen factores ajenos a la turbulencia atmosférica que perjudican el desempeño del lazo de control de AO, y reducen la confiabilidad de la imagen astronómica resultante. Se trata de las vibraciones, generadas por diversos factores de la instrumentación

o de las condiciones climáticas que inducen resonancias en el sistema.

Ya que el desempeño de sistemas de óptica adaptativa se ve afectado por el efecto de vibraciones, existe un creciente interés en el tópico de la mitigación de ellas. Ésta área de estudio cobrará más significancia para proyectos astronómicos futuros, los que pretenden alcanzar resoluciones cada vez más precisas.

El siguiente trabajo de Tesis se basa en el estudio de los lazos de AO y el efecto de las vibraciones en su desempeño. Para ello, se disponen de datos reales capturados por los sensores de MagAO, a partir de los cuales se modela el sistema y se proponen alternativas de control, las que son testeadas con simulaciones. El objetivo de este análisis es la propuesta de soluciones al problema de vibraciones, con alcances de implementación en los proyectos astronómicos actuales.

1.1. Estado del Arte

Un lazo de control de AO sigue un esquema básico en su estructura instrumental para cumplir los objetivos de detección y corrección de turbulencia atmosférica. Sin embargo, debido a las condiciones a la que cada sistema astronómico está sujeto, como también a los requerimientos que caracterizan a cada telescopio, los sistemas de AO se diseñan de forma específica para cada aplicación.

El diseño del sistema MagAO se ha documentado de forma extensa, a partir de los primeros alcances de diseño, los requerimientos a cumplir y las características de la instrumentación propuesta [3] [4]. Los primeros resultados de MagAO funcionando a lazo cerrado se han presentado en [5], y los resultados en pruebas de laboratorio de la instrumentación involucrada en el sistema se han documentado en [6] [7].

Un análisis extensivo del estado y desempeño de MagAO en observaciones astronómicas se presenta en [1] [2]. Adicionalmente, se han documentado los resultados que MagAO ha sido capaz de obtener en cuanto a la observación de exoplanetas [8] [9] y otros cuerpos celestes [10] [11].

El próximo paso en mejorar el desempeño de un sistema de óptica adaptativa como MagAO es la mitigación de vibraciones causadas por los instrumentos o el telescopio mismo. Sin embargo, no existe amplio desarrollo de este tema para el sistema MagAO.

Se conoce la presencia de vibraciones que afectan al sistema [5], las que han sido atribuidas a resonancias del telescopio mismo o a la influencia de la frecuencia de la red eléctrica. Lo que no ha sido ampliamente desarrollado es el análisis de vibraciones generadas por otros elementos del sistema, como también no se han desarrollado técnicas de mitigación de vibraciones para MagAO.

En otros sistemas de AO como el sistema GeMS del telescopio Gemini Sur (Observatorio Gemini, Chile) [12] [13] o el proyecto CANARY del telescopio William Herschel (Observatorio del Roque de Los Muchachos, España) [14], se ha analizado la presencia de vibraciones en los resultados obtenidos durante observaciones astronómicas.

Para estos sistemas de AO, se han generado propuestas de nuevos diseños para lazo de control, con el objetivo de mitigación de vibraciones. Se han usado resultados de observación astronómica para modelar el lazo de control, siguiendo un esquema estándar de modelo, e

incluyendo la presencia de vibraciones [14]. Luego, se han propuesto distintas alternativas de control, como LQG [13] [14] [15], \mathcal{H}_2 [12] o \mathcal{H}_∞ [13], entre otras. Posteriormente, se han presentado resultados de implementaciones de estas alternativas en los controladores en tiempo real de los sistemas de óptica adaptativa asociados.

El presente trabajo de Tesis tiene por objetivo extender el análisis de vibraciones en MagA al diseño de un modelo para el sistema, junto a propuestas de control. Los primeros pasos en identificación de vibraciones en MagAO se han presentado en [16] [17], y propuestas de modelado y control a partir de los resultados obtenidos se han presentado en [18].

1.2. Identificación de Problemas

Los factores perjudiciales en las observaciones astronómicas, como las vibraciones o la turbulencia atmosférica, comparten un efecto común: nos alejan del límite de difracción.

El objetivo del uso de AO, así como del uso de diferentes tecnologías de control o de mitigación de vibraciones, es alcanzar el límite de difracción. Éste define un límite teórico en la resolución de las imágenes capturadas, dado por la difracción del haz de luz incidente, y dependiente de la longitud de onda de la luz observada y del diámetro del telescopio. Una observación astronómica capaz de resultados con la resolución determinada por este límite teórico se denomina *diffraction-limited*.

Por otro lado, la aberración de la atmósfera en el haz incidente se denomina el “seeing” astronómico. Luego, si éste dicta el límite máximo de la resolución, entonces la observación se denomina *seeing-limited*.

La presencia de AO de alta precisión en un sistema astronómico puede permitir a un sistema sobrepasar el límite por seeing y acercarse cada vez más al límite máximo dictado por la difracción. Sin embargo, la turbulencia atmosférica no es el único factor que nos aleja del límite por difracción. El funcionamiento de ciertos elementos de la instrumentación, como también la presencia de corrientes de viento en la cúpula del telescopio, pueden generar vibraciones en el sistema. Éstas se traducen en perturbaciones del lazo de control.

Entre las posibles fuentes de perturbación que tienen efecto en las mediciones se consideran las vibraciones inherentes del telescopio (debido a su estructura física), la red eléctrica de la instalación, elementos de refrigeración como ventiladores o bombas de enfriamiento, entre otros.

Las influencias que las resonancias mecánicas generan en el desempeño de los telescopios suelen ser comparativamente pequeñas a la resolución de la imagen obtenida. Sin embargo, para los nuevos proyectos astronómicos, con exigencias de resolución mucho más altas, la mitigación de estas vibraciones cobrarán más importancia.

1.3. Contribución de Tesis

La contribución principal de la Tesis es la propuesta de mejoras para el sistema MagAO con el objetivo de mejorar la calidad de las imágenes científicas obtenidas. En particular, el análisis de vibraciones y su posterior mitigación permite extender los resultados obtenidos a otros sistemas en diferentes instalaciones astronómicas.

De forma más específica, se pueden mencionar que las principales contribuciones de la Tesis son el análisis de las vibraciones presentes en el lazo de control del sistema MagAO, la obtención de un modelo lineal para el lazo de control de MagAO, y las propuestas de control con objetivo de mejorar la imagen resultante.

Los resultados del análisis vibratorio de MagAO han dado origen a las publicaciones [16], [17], mientras que los primeros alcances de modelado y control para el sistema han sido publicados en [18].

1.4. Estructura del Documento

Capítulo 1. Introducción al trabajo de Tesis. Se introducen de forma general los conceptos asociados al tema de estudio, el estado del arte, los problemas a los que responde esta investigación, contribuciones del trabajo y descripciones por capítulo.

Capítulo 2. Conceptos básicos de instrumentación astronómica. Se presenta la estructura y diseño de un telescopio, y el funcionamiento de un sistema de óptica adaptativa.

Capítulo 3. Sistema de óptica adaptativa MagAO. Se enumeran las especificaciones de la instrumentación involucrada en el sistema, como también los principios de funcionamiento y características fundamentales. Finalmente, se presenta parte de los resultados obtenidos por MagAO en observaciones astronómicas.

Capítulo 4. Análisis de vibraciones en el sistema MagAO, a través del procesamiento de datos capturados durante sesiones de observación. Se describe el trabajo de obtención de densidades espectrales de potencia, y los resultados obtenidos en cuanto a las vibraciones presentes en el sistema.

Capítulo 5. Modelado para el sistema MagAO. Este desarrollo se basa en trabajos previos de distintos centros astronómicos, como también en los resultados obtenidos en el Capítulo 4. Se presenta el procedimiento de modelado para el lazo de control (según el esquema estándar de lazo de AO) y para las fases de turbulencia y de vibraciones presentes en el frente de onda del haz incidente.

Capítulo 6. Control para el lazo de óptica adaptativa de MagAO, en base al modelo generado en el Capítulo 5. En base a resultados de simulación, se compara el desempeño de alternativas de control integrativo y control óptimo basado en minimización de varianza de error.

Capítulo 7. Se presentan las conclusiones del trabajo realizado, y se discuten alcances de trabajo futuro.

INSTRUMENTACIÓN ASTRONÓMICA

La siguiente sección introduce los conceptos preliminares de instrumentación astronómica. Se presenta la estructura de diseño de los telescopios de alta envergadura para observación astronómica. Luego, se introduce el concepto de turbulencia atmosférica. Posteriormente, se describen los efectos de la atmósfera en las observaciones. Por último, se presenta la tecnología de la óptica adaptativa y la instrumentación involucrada en su lazo de control.

2.1. Telescopios para Observación Astronómica

La principal fuente de información para el estudio de los cuerpos celestes de nuestra galaxia es la radiación electromagnética que ellos emiten y que incide sobre nuestro planeta. El telescopio es la herramienta especializada en la captura de esta radiación, y de esta forma, es esencial para los estudios astronómicos.

Hoy en día, los avances tecnológicos a través del desarrollo de la astronomía han llevado a la construcción de telescopios de alta envergadura, controlados por sistemas electromecánicos y de alta precisión. Estos telescopios son capaces de aprovechar la radiación proveniente de los cuerpos celestes en todo su espectro, no sólo por telescopios ópticos (que capturan luz visible), sino también por telescopios infrarrojos, ultravioleta y radiotelescopios.

Mientras que en telescopios de menor escala suelen usarse lentes para el manejo del haz de luz (telescopios refractores), en aplicaciones de gran escala, se usan telescopios reflectores, basados en espejos. Esto se debe a que un telescopio reflector permite, a menor costo, alcanzar las exigencias de precisión en el manejo de los rayos de luz. Específicamente, un lente debe tener ambas caras precisamente pulidas y ser construido de un material homogéneo, mientras que para un espejo, sólo se exige precisión en una de sus superficies.

El espejo primario es la superficie principal de recolección de luz en un telescopio reflector. Es éste el que se posiciona con su cara reflectora hacia el cuerpo celeste de interés. El espejo primario más grande presente en un telescopio actualmente en funcionamiento es el espejo de 8.4 metros de diámetro empleado en el Large Binocular Telescope, pero mediante el uso de segmentación, es posible simular el uso de un espejo primario de mayor tamaño, como el de 10.4 metros de diámetro del Gran Telescopio Canarias. El haz es redirigido a través de

los espejos del telescopio.

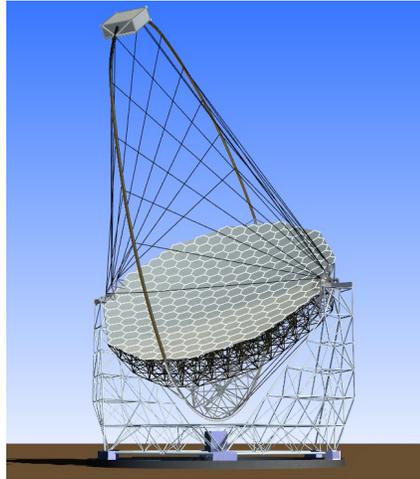


Figura 2.1: Modelo 3D de un telescopio. El espejo primario (disco gris, centro de la imagen) recolecta la luz incidente y la redirige hacia el armazón de la cámara (esquina superior derecha). En configuraciones de mayor complejidad, se usa un espejo secundario en lugar de la cámara, redirigiendo el haz de luz hacia posiciones externas al telescopio. Fuente: A. Okumura *et al.* [19]

Los grandes telescopios suelen localizarse y agruparse en observatorios astronómicos. Estas locaciones de investigación astronómica se clasifican en cuatro categorías: terrestres, subterráneos, aéreos y espaciales, cada uno de ellos con sus beneficios y desafíos.



Figura 2.2: Fotografía del Observatorio Las Campanas, observatorio terrestre situado en la III Región de Atacama, Chile. En él, se encuentra el Telescopio Clay (esquina superior izquierda), cuyo sistema de óptica adaptativa, MagAO, es el objeto de estudio de esta Tesis. Fuente: “Visita Observatorio Astronómico Profesional Las Campanas”, en <http://www.exampfuls.cl>, 23 Oct. 2014. Imagen editada.

2.1.1. Telescopio Ideal

La luz emitida por un cuerpo celeste se propaga desde su fuente puntual, pero debido a la lejana distancia del cuerpo a la Tierra, los rayos de luz capturados por el telescopio se consideran paralelos entre sí. Por lo tanto, es posible considerar que el haz llega a la superficie terrestre en la forma de un frente de onda plano.

Sin embargo, al entrar en la apertura circular del telescopio, la luz experimenta difracción, generando un patrón de interferencia circular. Por lo tanto, la imagen resultante al observar un cuerpo celeste no es un punto perfecto, sino un patrón conocido como el Disco de Airy.

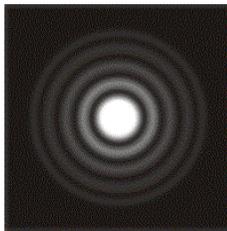


Figura 2.3: Disco de Airy ideal, patrón observable en la observación de un cuerpo celeste. Fuente: “Resolving Power of a Telescope”, en <http://www.rocketmime.com/>, 15 Nov. 2012.

La máxima resolución que un telescopio puede alcanzar está dada por el radio del disco central del patrón de Airy, esto es, la distancia angular del primer mínimo al máximo central. Este valor, en radianes, está dado por

$$R = \frac{1.22\lambda}{D} \quad (2.1.1)$$

donde λ es la longitud de onda de la luz incidente, y D el diámetro de la apertura del telescopio, es decir, de su espejo primario. Cuando un sistema de observación astronómico obtiene imágenes de ésta resolución, se le llama limitado por difracción o *diffraction-limited*.

Cabe notar que, mientras mayor sea el diámetro del telescopio, menor es el radio del disco de Airy, y por tanto, mejora su resolución. En la observación de objetos celestes cercanos entre sí, el límite de difracción puede causar dificultad en separar ambas fuentes de luz (ver Figura 2.4). Éste es el principal beneficio de la construcción de telescopios de apertura cada vez mayor.

El caso anteriormente descrito es el ideal, donde los rayos de luz inciden sobre el telescopio de forma paralela, en un frente de onda plano, sin variación de fase en el plano incidente. Sin embargo, la observación del telescopio está sujeta a la interferencia que el haz de luz recibe en el camino desde el cuerpo celeste hasta los instrumentos de medición, por factores como la turbulencia atmosférica o vibraciones del sistema.

2.1.2. Estructura y Diseño del Telescopio

El telescopio reflector puede ser diseñado en diversas configuraciones. A continuación, se presentan alternativas de diseño de un telescopio según la configuración de sus espejos, su montura y la estructura del espejo primario.

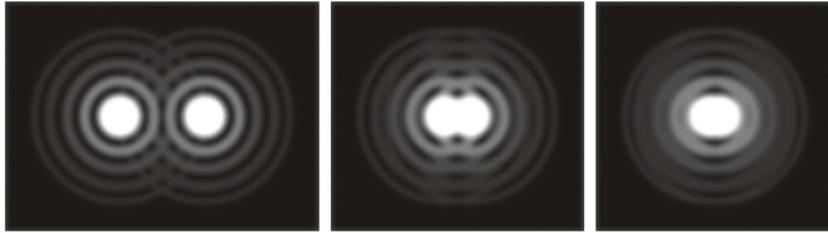


Figura 2.4: Discos de Airy en la observación de dos cuerpos celestes cercanos. Se observa cómo la capacidad de distinguir puntos cercanos depende de la apertura del telescopio. Fuente: “Resolving Power of a Telescope”, en <http://www.rocketmime.com/>, 15 Nov. 2012.

A. Diseño del Telescopio

El diseño de un telescopio determina la configuración de sus espejos dentro del instrumento. Distintas alternativas emplean diversas formas de la capa reflectante de los espejos (esféricos, paraboloides, elipsoides), como también sitúan los instrumentos de medición en diferentes posiciones.

Entre las estructuras de mayor uso en telescopios de alta envergadura, se puede mencionar el telescopio newtoniano, el gregoriano y el Cassegrain (Figura 2.5).

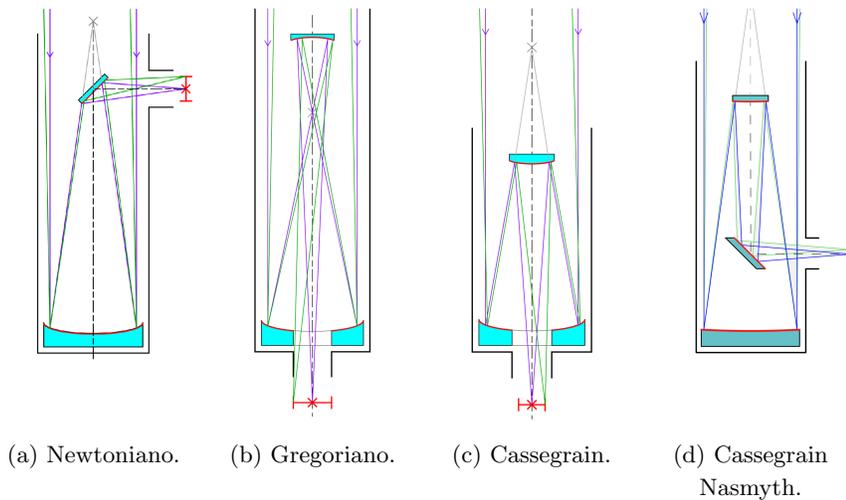


Figura 2.5: Diagrama del recorrido de la luz a través de telescopios de distinto diseño. Fuente: Wikimedia Commons. (a): Krishnavedala, “Diagram of the lightpath through a Newtonian telescope”. (b): Krishnavedala, “Diagram of the lightpath through a Gregorian telescope”. (c): Krishnavedala, “Diagram of the lightpath through a Cassegrain telescope”. (d): Jailbird, “Light path in a Nasmyth telescope”. Imágenes editadas.

1. El telescopio newtoniano emplea un espejo secundario plano y en una posición diagonal. Éste redirige el haz de luz al costado del telescopio, donde se sitúa la instrumen-

tación de medición (Figura 2.5a).

2. El telescopio gregoriano es aquel que usa un espejo secundario cóncavo, y redirige el haz de luz de vuelta a dirección del primario. El primario suele poseer un agujero central por el cual atraviesa el haz de luz, y la óptica adicional para trabajar el haz se sitúa tras el espejo primario (Figura 2.5b).
3. El telescopio Cassegrain es similar al Gregoriano, pero su espejo secundario es convexo en vez de cóncavo, permitiendo una construcción más reducida (Figura 2.5c).
4. El diseño Nasmyth se puede implementar en los telescopios gregoriano y Cassegrain. Este diseño emplea un espejo terciario que refleja la luz al costado del telescopio, en vez de usar un agujero en el espejo primario. El diseño Nasmyth en un telescopio Cassegrain se presenta en la Figura 2.5d.

Cabe notar que es posible dotar de distintos sistemas de medición a un mismo telescopio, aprovechando las posiciones de los focos. Es decir, se puede usar el foco Cassegrain (bajo el espejo primario a través de su agujero) para ciertos instrumentos, y varios focos Nasmyth para otros, manejando la redirección del haz de luz con el espejo terciario.

B. Montura de Telescopio

Para poder apuntar de forma precisa al objeto celeste de interés, los telescopios son soportados por una estructura mecánica que es capaz de posicionar el eje de visión según los requerimientos de observación. Esta estructura es la montura del telescopio.

De las diversas estructuras existentes de montura, dos de ellas son las más ampliamente usadas en telescopios de alta envergadura: la montura altazimutal y la montura ecuatorial (Figura 2.6).

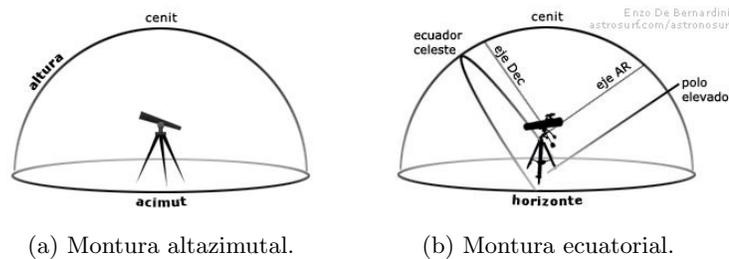


Figura 2.6: Diagramas de monturas para un telescopio. Fuente: “Monturas”, en <http://www.astrosurf.com/>, 29 Dic. 2011.

1. La montura altazimutal otorga al telescopio dos ejes de movimiento: el de altitud (movimiento vertical, de 0 a 90 grados) y el de acimut (movimiento horizontal, de 0 a 360 grados). Por tanto, el reposicionamiento del telescopio se realiza de forma precisa en conjunto de ambos ejes (Figura 2.6a).

2. La montura ecuatorial compensa la rotación de la Tierra al tener uno de sus ejes paralelo al eje de rotación: el eje de Asención Recta. De esta forma, el trabajo de seguimiento del cuerpo celeste es más simple, al tener que mover sólo el eje de Declinación. Sin embargo, el manejo de estas coordenadas es menos intuitivo que el caso altazimutal, y requiere de una precisa alineación para conseguir que el plano de movimiento sea paralelo al eje del ecuador terrestre (Figura 2.6b).

C. Estructura del Espejo Primario

Como ha sido mencionado anteriormente, es beneficioso construir telescopios de gran apertura (es decir, espejos primarios de gran tamaño), pues permite alcanzar mayores niveles de resolución. Para la manufactura de espejos de gran tamaño, pueden ser empleados espejos monolíticos o segmentados (Figura 2.7).

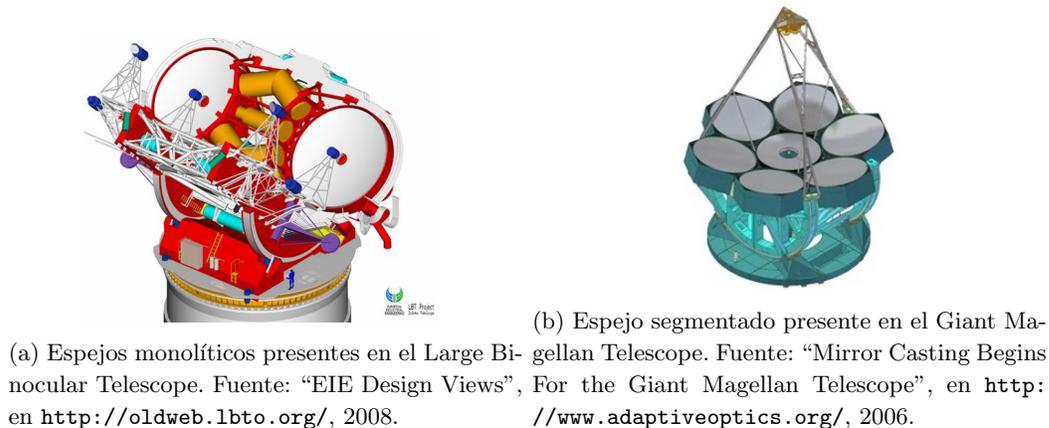


Figura 2.7: Diagramas de telescopios con distinta estructura del espejo primario.

Los espejos monolíticos son aquellos fabricados de sólo una pieza de vidrio sólido. Debido a los requerimientos de precisión, como también problemas de deformación en posiciones inclinadas, existen limitaciones en el diámetro que pueden alcanzar.

Actualmente, los espejos primarios monolíticos más grandes están presentes en el Large Binocular Telescope (LBT). Este instrumento se compone de dos telescopios ubicados en una misma estructura, presentando dos espejos primarios monolíticos de 8.4 metros de diámetro (Figura 2.7a).

Para aumentar la apertura del telescopio, se usa la estrategia de espejos segmentados: un arreglo de espejos de menor tamaño que actúan como segmentos de un espejo curvo singular. Cada uno de estos segmentos deben ser precisamente pulidos (no necesariamente con la misma curvatura entre ellos) y deben mantenerse alineados. Además, la imagen resultante está sujeta a difracción debido al uso de segmentos. Sin embargo, con esta estrategia es posible alcanzar espejos primarios de gran tamaño.

La Figura 2.1 presenta un diagrama de espejo primario con segmentos hexagonales. Ejemplos de telescopios que usan segmentación son el Gran Telescopio Canarias, con un

espejo de 36 segmentos hexagonales y un total de 10.4 metros de diámetro, y el proyecto del Giant Magellan Telescope (Figura 2.7b). Este último emplea siete espejos circulares de 8.4 metros de diámetro para simular un espejo primario de 24.5 metros de diámetro.

Tanto en el caso monolítico como en el segmentado, se requiere que el espejo primario, o sus segmentos, mantenga su posición y forma con alta precisión, incluso bajo efectos de la inclinación del telescopio o de factores externos climáticos. La tecnología que responde a este problema es la óptica activa.

2.1.3. Óptica Activa

El espejo primario del telescopio reúne la luz del astro en observación. Por tanto, mientras mayor tamaño tiene el espejo primario, más luz es capaz de recopilar. Sin embargo, también se requiere que el espejo primario mantenga su forma incluso en posiciones inclinadas, lo que sugiere que se deben manufacturar muy gruesos y pesados.

La óptica activa es la tecnología que involucra el uso de pistones controlados computacionalmente y conectados al espejo primario, pudiendo actuar también sobre el espejo secundario. El objetivo de la óptica activa es mantener la forma ideal del espejo, compensando por los efectos de deformación del espejo primario frente a cambios en la inclinación del telescopio.

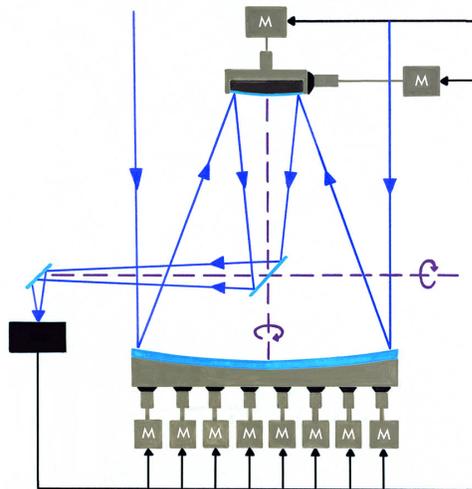


Figura 2.8: Diagrama de sistema de óptica activa. Fuente: ESO. “Principle of Active Optics (ActO)”, en <http://www.eso.org/>, 3 Dic. 2009. Imagen editada.

De este modo, la óptica activa permite usar espejos primarios grandes pero de poco grosor, manteniendo la forma del espejo y reduciendo costos de manufactura.

La imagen estelar observada se registra por un sensor de frente de onda, y el computador que recibe la señal del sensor computa las señales de corrección para activar los pistones que recuperarán la forma deseada del espejo primario.

La óptica activa también es esencial en el caso de espejos segmentados, pues cada uno

de ellos debe mantener su curvatura e inclinación con respecto a su posición en el arreglo.

2.2. Seeing Atmosférico

El haz de luz proveniente de un cuerpo celeste debe atravesar las capas atmosféricas para llegar a la apertura del telescopio terrestre. Debido a la presencia de turbulencia atmosférica, el frente de onda plano del haz de luz se ve distorsionado, reduciendo la resolución de las imágenes obtenidas por el telescopio. Este efecto perjudicial en las observaciones astronómicas se denomina *seeing atmosférico*.

Un sistema de observación astronómica es *seeing-limited* cuando la resolución de sus resultados está limitada por los efectos del *seeing* atmosférico.

2.2.1. Turbulencia Atmosférica

A grandes rasgos, la turbulencia atmosférica es la presencia de corrientes de viento y temperatura no uniforme en la atmósfera de nuestra tierra, que se reflejan en un flujo turbulento del aire, en forma de remolinos de distintos tamaños.

Este fenómeno genera cambios de fase en los rayos de luz provenientes de los cuerpos celestes. El cambio de medio del vacío del espacio hacia nuestra atmósfera, y los cambios de temperatura a la que es expuesto el haz de luz, generan distorsión en el frente de onda incidente.

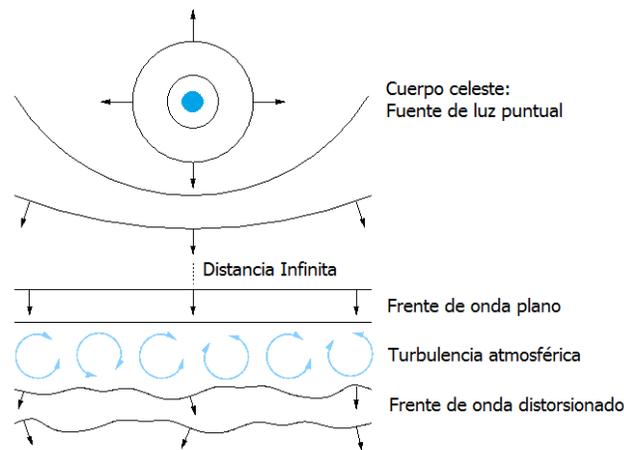


Figura 2.9: Diagrama del efecto de la atmósfera sobre los rayos de luz de un cuerpo celeste. Fuente: “The Atmosphere”, en <http://www.vikdhillon.staff.shef.ac.uk/>, 28 Oct. 2013. Imagen editada.

El flujo turbulento presente en las corrientes de aire atmosféricas es caótico y altamente irregular, por lo que suelen ser descritos mediante métodos estadísticos. El modelo de Kolmogorov se suele usar para describir el flujo turbulento de la atmósfera y su influencia en el frente de onda de la luz incidente [20].

Por otra parte, una simplificación al modelo de turbulencia usada para describir los efectos en el *seeing* está dada por la hipótesis de Taylor [21]. Ésta aproximación concentra la energía de la turbulencia a mayores escalas turbulentas, es decir, remolinos de mayor tamaño, los que están asociados a bajas frecuencias. Así, se puede despreciar los efectos de escalas turbulencias pequeñas.

2.2.2. Medición del *Seeing*

El frente de onda plano del cuerpo celeste puntual, al atravesar la apertura del telescopio, genera una imagen sujeta a difracción. La función que describe el patrón generado en la imagen resultante se denomina función de dispersión de punto (*point spread function*). En el caso del telescopio ideal, la función de dispersión de punto corresponde al disco de Airy.

En cambio, en el caso sujeto a *seeing* atmosférico, la imagen experimenta fluctuaciones en intensidad, resolución y posición. Este fenómeno se denomina centelleo (*scintillation*) o movimiento de imagen (*image motion*).

Con un tiempo de exposición suficientemente alto, las distintas imágenes capturadas se promedian en un disco similar al disco de Airy, pero de mayor diámetro y menor peak de magnitud. Éste se denomina el disco de *seeing* (*seeing disc*).

Existen varias formas de medir el *seeing* atmosférico en base a la función de dispersión de punto obtenida.

La anchura a media altura del *seeing* (*full width at half maximum*, FWHM). Se refiere al diámetro angular a media altura de la función de dispersión de punto, también denominado diámetro del disco de *seeing*. Su valor varía según las condiciones de la noche específica de observación e incluso puede variar en un rango de minutos durante la observación. El FWHM del *seeing* se suele medir en unidades angulares de arcosegundos, abreviado con el símbolo $''$. Un valor de *seeing* de $1.0''$ o menor indica buenas condiciones atmosféricas para observación.

La razón de Strehl. Se define como la razón entre la magnitud del máximo en la función de dispersión de punto y la magnitud del máximo en el disco de Airy que se obtendría en un caso ideal. La razón de Strehl toma valores entre 0 y 1, siendo 1 el caso ideal del disco de Airy. Se suele denominar un sistema astronómico como *diffraction-limited* cuando la razón de Strehl tiene un valor mayor que 0.8.

La tecnología presente en los telescopios modernos es capaz de contrarrestar el efecto de la turbulencia atmosférica, superando el límite por *seeing* y acercándose al límite por difracción. Una de las tecnologías más significativas que cumple este objetivo es la óptica adaptativa.

2.2.3. Dispersión Atmosférica

El *seeing* atmosférico no es el único efecto perjudicial de la atmósfera sobre las observaciones astronómicas. Para distancias grandes desde el cenit, es decir, cerca del horizonte, existe otro factor a considerar: la dispersión atmosférica.

Este efecto, también llamado refracción dependiente de la longitud de onda, provoca que la banda visible se refracte en distinta medida según longitud de onda, y se observe en la

imagen astronómica la separación en el espectro de la luz visible (secciones rojas y azules en la imagen obtenida). La dispersión atmosférica no se ve presente cuando el telescopio se encuentra en posición vertical apuntando al cenit, pero se acentúa al acercarse al horizonte.

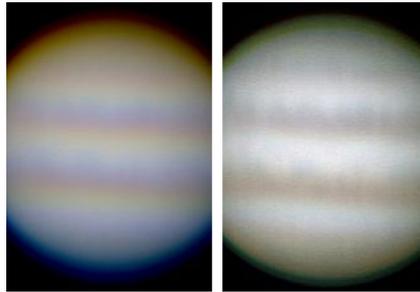


Figura 2.10: Ejemplo de distorsión atmosférica. Izquierda: imagen sujeta al efecto de la distorsión atmosférica. Derecha: imagen con corrección de distorsión atmosférica. Fuente: “Atmospheric Dispersion Corrector”, en <http://www.astrosystems.nl>.

El instrumento que corrige este efecto es el corrector de dispersión atmosférica (atmospheric dispersion corrector, ADC). El ADC consiste en un sistema de prismas rotatorios que refractan el haz incidente de forma de volver a recuperar el haz original.

2.3. Óptica Adaptativa

La óptica adaptativa (Adaptive Optics, AO) [22] es una técnica óptica basada en espejos deformables controlados computacionalmente, capaz de corregir en tiempo real las distorsiones causadas por la turbulencia de la atmósfera. Usando esta técnica, es posible obtener en la superficie terrestre imágenes astronómicas de nitidez comparable a las obtenidas en observatorios espaciales. Un resultado real de la mejora en la imagen astronómica producto de la óptica adaptativa se presenta en la Figura 2.11.

El proceso de funcionamiento del lazo de control de óptica adaptativa inicia con la detección del frente de onda del haz incidente. Para poder detectar el frente de onda, se emplea una fuente luminosa como referencia, proveniente de una estrella guía natural, o en su defecto, de una estrella guía láser (sección 2.3.1).

La luz de esta fuente se dirige a un sensor de frente de onda (sección 2.3.2), el que envía la información detectada al sistema de control. A través del procesamiento de control, se escoge una configuración para la superficie del espejo deformable (sección 2.3.3).

El haz de luz que entra distorsionado al telescopio se refleja en el espejo deformable, cuya superficie ha sido escogida para corregir la distorsión y recuperar el frente de onda plano del haz.

Finalmente, la cámara científica recibe el frente de onda corregido y genera la imagen científica. En aplicaciones astronómicas, tal como en otras aplicaciones de fotografía digital, se usan dispositivos de carga acoplada (Charged Coupled Devices, CCD). La alta sensibilidad a la luz de estos dispositivos (la más alta entre tecnologías de detección de luz), junto a su capacidad de exposiciones de larga duración, los convierte en ideales para observaciones

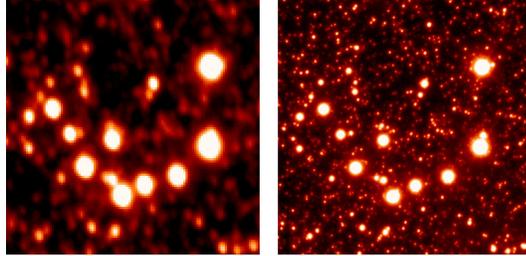


Figura 2.11: Ejemplo de mejoramiento de imagen científica usando óptica adaptativa. Imagen de región central del cúmulo globular Omega Centauri (sistema MAD del telescopio LBT). Izquierda: instrumento *seeing-limited*, con un FWHM de $1.0''$, lo que sugiere buenas condiciones de observación. Derecha: corrección con sistema MCAO, obteniendo un FWHM de $0.1''$. Fuente: Enrico Marchetti, “Adaptive optics widens its view”, en <http://spie.org/>, 8 Dic. 2009.

astronómicas.

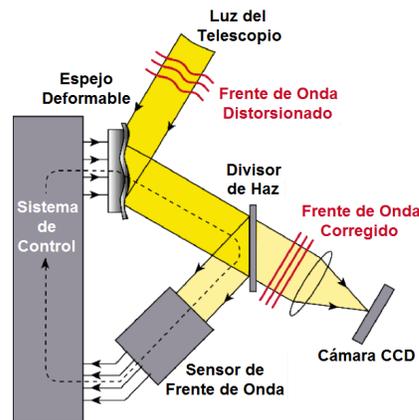


Figura 2.12: Esquema de un sistema estándar de óptica adaptativa clásico. Fuente: Claire Max, “Introduction to Adaptive Optics and its History”, en <http://www.ucolick.org/>, Ene. 2001. Imagen editada.

2.3.1. Estrellas Guía

Para obtener una correcta estimación del *seeing* atmosférico, se observa y analiza una fuente de luz del espacio, la que debe ser suficientemente luminosa. Cuando el cuerpo celeste observado es muy tenue, se usa un cuerpo celeste luminoso cercano como referencia para la corrección de *seeing*. Las fuentes luminosas usadas para este propósito se denominan Estrellas Guías Naturales.

Sin embargo, éstas no están disponibles en todas partes del cielo, limitando la observación. Para ello, se emite un rayo láser desde el telescopio hacia el punto de observación. El

rayo se refleja en la atmósfera, y llega al telescopio perturbado por ella. De esta forma, se emplea esta fuente de luz, en conjunto a la de las estrellas tenues cercanas, para detectar la distorsión atmosférica.

La fuente de luz proveniente del láser se denomina Estrella Guía Láser, y es un elemento fundamental en la reconstrucción de la turbulencia atmosférica, y por lo tanto, fundamental para la implementación de un sistema de óptica adaptativa.



Figura 2.13: Fotografía del observatorio W.M.Keck (Mauna Kea, Hawaii), usando estrellas guía láser. Fuente: Ethan Tweedie Photography (<http://www.ethantweedie.com/>), “Observatory Photography”.

2.3.2. Sensores de Frente de Onda

El sensor de frente de onda (Waveform Sensor, WFS) no mide el frente de onda de forma directa, sino que a través de manipulación del haz usando lentes o prismas. De esta forma, se puede reconstruir el frente de onda a partir de la distribución de intensidad de la luz en un plano, observado con una cámara CCD. Los dos tipos de WFS más usados en aplicaciones astronómicas son el WFS de tipo Shack-Hartmann y los WFS piramidales

El WFS de Shack-Hartmann (SH-WFS) estima el frente de onda usando una matriz de lentes y un detector (Figura 2.14). Cuando un frente de onda plano incide sobre la matriz de lentes del SH-WFS, genera en la cámara un patrón regularmente espaciado de puntos. Por otro lado, cuando un frente de onda distorsionado incide sobre el SH-WFS, los puntos se desplazarán para cada lente, información empleada para estimar el frente de onda.

Por otro lado, el sensor piramidal o PWFS emplea un prisma piramidal (Figura 2.15). El haz de luz se dirige hacia el vértice del prisma, generando en su base cuatro imágenes formadas por la geometría del prisma. El detector que recibe esta luz estima el frente de onda a través de la comparación entre las imágenes formadas, denominadas pupilas.

Los WFS piramidales se caracterizan por tener mejor resolución que el caso Shack-Hartmann, generando resultados con menor ruido. Adicionalmente, poseen un gran rango dinámico, lo que permite detectar frentes de onda en observaciones de distintas intensidades de luz, ajustando el detector. Sin embargo, requieren de mayor precisión en el alineamiento del sistema.

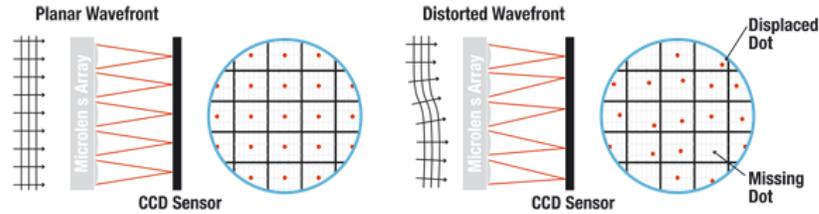


Figura 2.14: Diagrama de funcionamiento de WFS Shack-Hartmann. Fuente: “MEMS-Based Deformable Mirrors”, en <http://www.thorlabs.com/>.

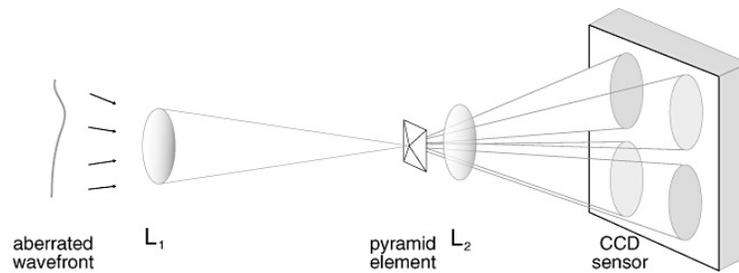


Figura 2.15: Diagrama de funcionamiento de WFS piramidal. Fuente: M. Lombardo y G. Lombardo [23].

2.3.3. Espejos Deformables

El espejo deformable (Deformable Mirror, DM) es la herramienta base en el sistema de óptica adaptativa. El objetivo del espejo deformable es de corregir la distorsión del frente de onda debido al *seeing* atmosférico. Para ello, el espejo es deformado mediante el manejo de actuadores, de modo que el haz de luz incidente recupere el frente de onda plano, al ser reflejado sobre su superficie.

Alternativas de manufactura de espejos deformables son los espejos piezoeléctricos, espejos bimorfos, basados en actuadores magnéticos o en sistemas microelectromecánicos (MEMS) [24]. Investigación ha sido desarrollada también para el uso de espejos deformables líquidos basados en nanopartículas ferromagnéticas en la corrección del frente de onda [25].

En instalaciones astronómicas modernas, es habitual la preferencia por espejos con su-

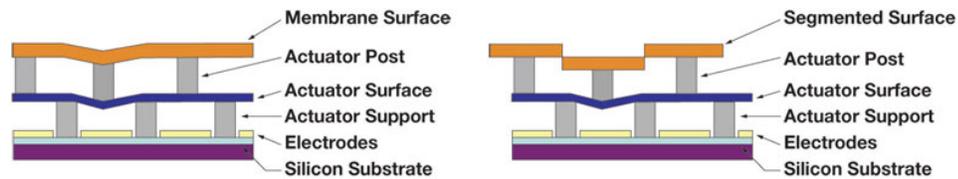


Figura 2.16: Diagramas de espejos deformables, basados en tecnología MEMS. Izquierda: superficie reflectora continua. Derecha: superficie reflectora segmentada. Fuente: “MEMS-Based Deformable Mirrors”, en <http://www.thorlabs.com/>.

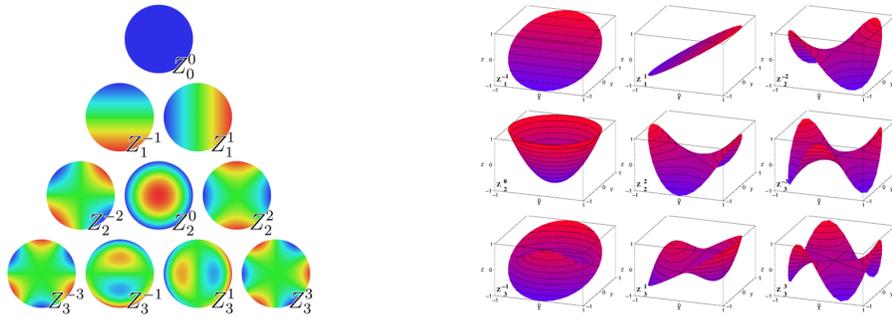
perficie reflectora continua, en vez de sus predecesores segmentados.

2.3.4. Descomposición en Modos

El frente de onda del haz incidente está definido dentro de la pupila circular dada por el espejo primario. Luego, es posible describir este frente de onda en un disco unitario, como función de las variables angulares de radio y ángulo.

Una función definida en el disco unitario se puede descomponer en factores ortogonales o “modos”, como por ejemplo, por polinomios de Zernike. Así, es posible modelar el frente de onda distorsionado a través de su descomposición modal. Otra alternativa para la reconstrucción de la fase del frente de onda es el uso de funciones de Karhunen-Loeve [26].

Los modos Zernike son descritos por un grado radial $n \geq 0$ y un grado azimutal $m \in [-n, n]$, tal que $\frac{m-n}{2} \in \mathcal{Z}$. La Figura 2.17 presenta un conjunto de los primeros polinomios de Zernike, representados en el disco unitario.



(a) Representación gráfica en el plano de modos Zernike de grado radial de 0 a 3.

(b) Representación gráfica en tres dimensiones de modos Zernike de grado radial de 1 a 3.

Figura 2.17: Diagramas de los primeros polinomios de Zernike. Fuente: Wikimedia Commons. (a): Rocchini, “The Zernike polynomials values”. (b): R. J. Mathar, “Zernike-Polynome bis zur vierten Ordnung sowie ein Beispiel sechster Ordnung”. Imágenes editadas.

Cabe destacar que los primeros modos Zernike suelen referenciarse por sus nombres. Algunos de estos modos Zernike son el modo pistón (Z_0^0), los modos tip y tilt (Z_1^{-1} y Z_1^1 respectivamente), el modo defocus (Z_2^0) y los modos de astigmatismo oblicuo y vertical (Z_2^{-2} y Z_2^2 respectivamente).

La descomposición en modos ortogonales del frente de onda simplifica de forma considerable el diseño de un lazo de control de óptica adaptativa. Esto es debido a que permite separar la dinámica del lazo de control por modos, y diseñar el sistema de control para cada modo por separado. Esto permite el uso de múltiples espejos deformables, dedicados a mitigar la aberración de un subconjunto de modos.

SISTEMA DE ÓPTICA ADAPTATIVA MAGAO

El objeto de estudio del presente trabajo de Tesis es el sistema de óptica adaptativa MagAO (6.5m Magellan Telescope Adaptive Optics), implementado en el telescopio Clay, uno de los dos telescopios Magellan del observatorio Las Campanas (LCO).

Los telescopios Magellan son operados por un consorcio conformado por la Universidad de Arizona, la Universidad de Harvard, El Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), la Universidad de Michigan, y el Instituto Carnegie de Washington. Ellos han sido diseñados con una configuración gregoriana y montura altazimutal, y sus espejos primarios monolíticos paraboloideos de 6.5 [m] de diámetro han sido manufacturados en el Steward Observatory Mirror Lab de la Universidad de Arizona.

Se ha escogido el Observatorio Las Campanas para su construcción pues estudios previos de la zona [27] otorgan excelentes resultados para operación, con valores medidos de FWHM de 0.65 [mas] en la banda visible (considerando que un buen valor para el FWHM es de 1 [mas] o menor).

La operación en los telescopios se ha iniciado el año 2001. Después de más una década de operación, se ha instalado el primer sistema de óptica adaptativa en el telescopio Clay: el sistema MagAO. Este sistema ha sido diseñado por la Universidad de Arizona, bajo el mando del Investigador Principal Dr. Laird Close, y junto a la contribución de instituciones de investigación socias a la Universidad.

MagAO se destaca por ser el primer sistema de AO en el hemisferio sur basado en un espejo secundario adaptativo (adaptive secondary mirror, ASM), y el primer sistema AO capaz de proveer imágenes de alta calidad limitadas por difracción, alcanzando resoluciones de hasta 20 [mas] [2]. La instrumentación asociada al sistema, que comprende herramientas como el sensor de frente de onda piramidal o cámaras científicas, se sitúan en el puerto Nasmyth del telescopio.

A continuación, se introduce el sistema de óptica adaptativa MagAO. Se presenta las características de la instrumentación involucrada en MagAO, detalles de su funcionamiento, y parte de los resultados que han sido obtenidos con su uso.

3.1. Instrumentación en MagAO

La Figura 3.1 describe la estructura general de los componentes del sistema MagAO.

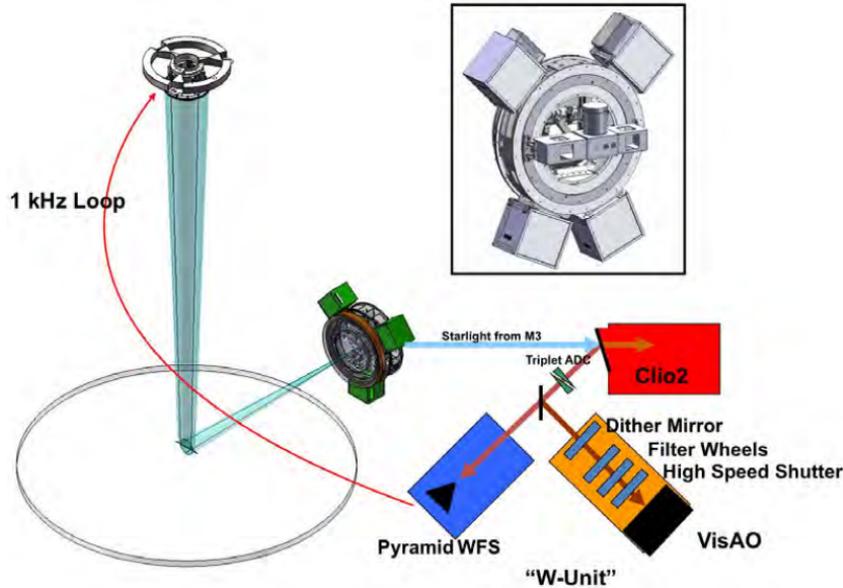


Figura 3.1: Diagrama del instrumento MagAO. Izquierda: diagrama de espejos en el telescopio Clay, para referencia de tamaños de espejo primario, secundario adaptativo (ASM) y redirección del haz hacia el puerto Nasmyth. Derecha arriba: anillo del puerto Nasmyth, el cual contiene instrumentación de MagAO. Derecha abajo: diagrama de instrumentos de MagAO: cámara infrarroja Clío2 y unidad de instrumentos W-Unit. Fuente: K. Morzinski *et al.* [1].

El sistema de AO corrige el frente de onda distorsionado usando el espejo secundario adaptativo: un espejo cóncavo elipsoidal comandado por 585 actuadores, que se localiza en la posición secundaria de la estructura Gregoriana del telescopio Clay. La configuración de la superficie del espejo se genera a través de la acción de 585 imanes y sensores capacitivos que miden la posición de los actuadores, trabajando dentro de un lazo de control de 70 [kHz], obteniendo un tiempo de respuesta para la configuración deseada menor a 1 [ms] [28].

3.1.1. Unidad de Instrumentos de MagAO: W-Unit

La “W-Unit” es el nombre del conjunto de instrumentos que conforman, junto al ASM, el sistema MagAO. Corresponde a un tablero de circuitos (*breadboard*) que se instala en el anillo de uno de los puertos Nasmyth (NAS Ring, fotografía en Figura 4.1). Posee instrumentos como el WFS y las cámaras CCD.

Mediante el uso de motores de traslación que trabajan en los ejes X, Y y Z, denominados Bayside Stages, la W-Unit es alineada al haz de luz. La precisión en el posicionamiento de la W-Unit es del orden de los micrómetros [1].

Entre la instrumentación presente en la W-Unit se destacan la cámara VisAO (para la banda de luz visible) y el sensor de frente de onda, que en el caso de MagAO, es uno piramidal (PWFS). La cámara infrarroja Clio2 no forma parte de la W-Unit, sino que lleva una instalación separada.

La Figura 3.2 presenta el tablero de circuitos de la W-Unit, indicando los instrumentos presentes en ella.

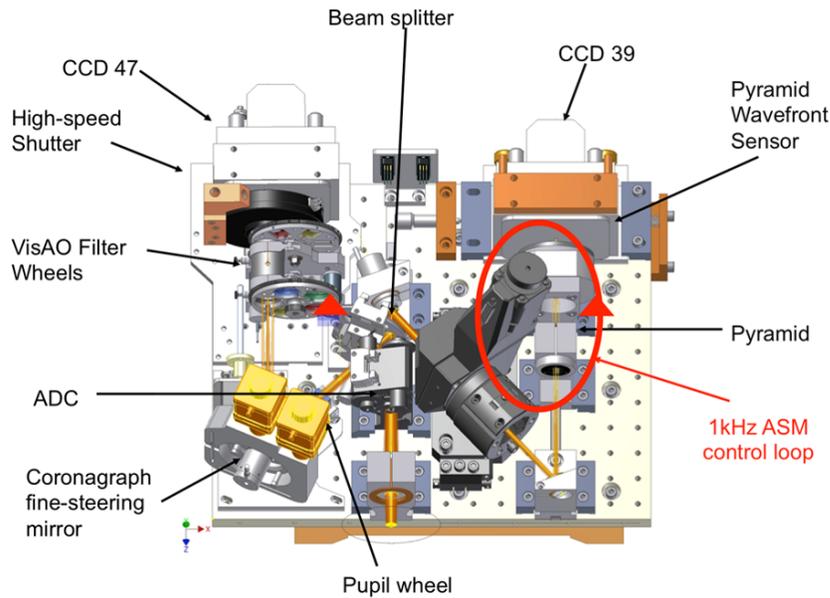


Figura 3.2: Diagrama del contenido de la W-Unit, entre los que se destacan el PWFS y VisAO. Fuente: K. Morzinski *et al.* [1].

El haz de luz proveniente de la atmósfera es reflejado hacia el puerto Nasmyth. Primero, se encuentra con un divisor de haz (*beamsplitter*), el cual separa la luz de longitud de onda $\lambda > 1[\mu m]$ transmitiéndola hacia la cámara infrarroja Clio2, y la longitud de onda más corta se dirige a la W-Unit.

Antes de transmitir hacia el PWFS y la cámara VisAO, el haz de luz atraviesa el corrector de dispersión atmosférica (ADC) [29]. Posterior a ello, un segundo *beamsplitter* en la W-Unit transmite una porción de la luz al PWFS y el resto lo captura la cámara VisAO.

Por el lado del PWFS, existe instrumentación dedicada para mantener el haz alineado a la punta del prisma piramidal del PWFS; un espejo tip/tilt provee la modulación, y un instrumento de rotación de imagen llamado K-mirror mantiene las pupilas del PWFS alineadas. El sensor mismo es una cámara (CCD 39, Figura 3.2) que captura las cuatro pupilas de la base del prisma piramidal.

Por el lado de la cámara VisAO, el haz se refleja en un espejo de cardán (*gimbal mirror*) de movimiento fino para alinear y redirigir el haz a la cámara (CCD 47, Figura 3.2), pasando por los filtros pasabanda de VisAO.

A. Sensor de Frente de Onda Piramidal de MagAO

Para medir el frente de onda del haz incidente, el sistema MagAO utiliza un sensor de frente de onda piramidal (PWFS), instalado en la W-Unit.

El lazo de control del PWFS en conjunto al ASM funcionan a una frecuencia de muestreo cercana a 1 [kHz]. El software dedicado de la cámara CCD del PWFS funciona descomponiendo la estimación de frente de onda en sus modos ortogonales, a partir de los cuales se genera el comando de control para los pistones del ASM y configurar la superficie deseada.

B. Cámara VisAO

La cámara VisAO [8] es una cámara CCD astronómica que no dista de las que se suelen emplear en aplicaciones astronómicas. Ésta posee una resolución de 1024x1024 pixeles y captura luz de longitud de onda entre 0.5 y 1.1 [μm] [2].

Cabe destacar que VisAO, diseñado para trabajar dentro de la banda visible (entre 0.4 y 0.7 [μm]), es capaz de obtener resultados en el infrarrojo. Por ejemplo, el primer resultado en detección de exoplanetas de MagAO ha sido la captura de imágenes de *beta Pictoris b* (Figura 3.4), la que se ha observado a una longitud de onda de 0.98 [μm] [9]. Aunque ésta se encuentra fuera de la banda visible, la operación conjunta MagAO+VisAO ha permitido que ésta sea la primera imagen de un exoplaneta captada por una cámara de banda visible, en vez de detectores especializados en el infrarrojo.

3.2. Operación de MagAO

Como el uso del sistema MagAO involucra la instalación del espejo secundario deformable, las sesiones de operación de MagAO se organizan de forma de minimizar tiempos de ingeniería (levantamiento de la estructura). Por esta razón, el sistema MagAO opera durante alrededor de un mes, dos veces al año. Su primera operación ha sido durante el segundo semestre del año 2012 (sesión 2012b, entre noviembre y diciembre).

Las jornadas de observación son llevadas a cabo por el Equipo MagAO: el equipo de investigadores y astrónomos de la Universidad de Arizona que opera el sistema MagAO. El equipo es liderado por Dr. Laird Close, y es conformado por científicos de distintas disciplinas, trabajando en conjunto con miembros de otros centros de estudio.

MagAO posee un conjunto de lazos de control optomecánicos trabajando en todo momento [1]. Los principales entre ellos son:

1. El lazo de control principal de óptica adaptativa. Funciona a una frecuencia de muestreo cercana a 1 [kHz], midiendo el frente de onda con el PWFS, reconstruyendo la fase con la unidad computacional básica (BCU) y enviando comandos de posición a los actuadores del ASM.
2. El lazo del lente de la cámara CCD 39 del PWFS. Mantiene la posición de las pupilas del PWFS iluminadas para ser capturadas por la cámara a una precisión de 0.1 pixeles, a una frecuencia de ~ 1 [Hz].

3. Lazo del ASM. Los sensores capacitivos del ASM controlan la posición de los actuadores a una precisión RMS de 5 [nm] y a una frecuencia de muestreo de 70 [kHz].
4. Lazo de óptica activa, que corrige la forma del espejo primario usando la captura de un sensor de frente de onda Shack-Hartmann integrado en el puerto Nasmyth.
5. Descarga del telescopio (*telescope offloading*). Para remover parte de la carga del sistema de óptica adaptativa ante errores de bajo orden en la fase detectada, el espejo secundario es reposicionado. Para los modos tip/tilt, se realiza esta corrección a una frecuencia de ~ 1 [Hz].

3.3. Resultados de MagAO en Operación

Desde el inicio de su funcionamiento, el sistema MagAO+VisAO ha permitido la obtención de observaciones astronómicas de alto nivel, generando incluso resultados nunca antes obtenidos en otros sistemas de óptica adaptativa.

Los cuerpos celestes que se han observado y publicado con el sistema MagAO han sido mayoritariamente exoplanetas [8] [9], como también se han generado resultados de sistemas binarios y los cuerpos de menor masa que los orbitan [30] [31].

A continuación, se presentan algunos de los resultados obtenidos en observaciones realizadas con el sistema MagAO.

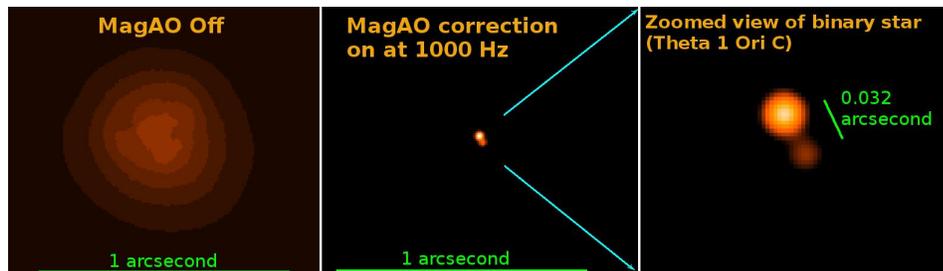


Figura 3.3: Imágenes de MagAO de estrella binaria θ^1 Orionis C. Izquierda: Foto “normal”, sin óptica adaptativa. Centro: Imagen capturada por MagAO, alcanzando una nitidez 17 veces superior. Derecha: Detalle de imagen capturada por MagAO. Es posible detectar la presencia de un sistema binario gracias al uso de óptica adaptativa. Fuente: “Diffraction-limited Visible Light Images of the Orion Trapezium Cluster With the Magellan Adaptive Secondary AO System (MagAO)”, en <https://visao.as.arizona.edu/>, 21 Ago. 2013.

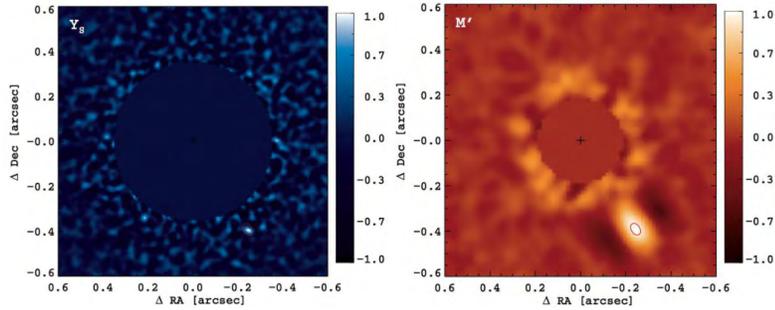
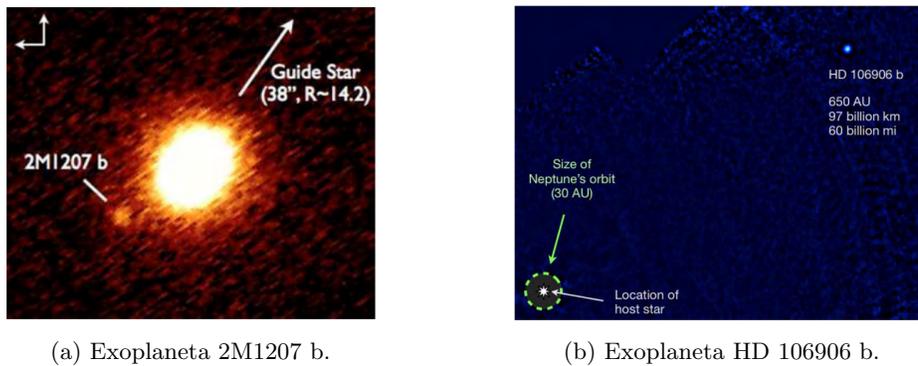


Figura 3.4: Imágenes de MagAO de exoplaneta β Pic b. Izquierda: captura de cámara VisAO. Derecha: captura de cámara infrarroja Clio2. El exoplaneta es observado en el área inferior derecha de ambas imágenes. Fuente: J. Males *et al.* [32].



(a) Exoplaneta 2M1207 b.

(b) Exoplaneta HD 106906 b.

Figura 3.5: Imágenes de objetos de masa planetaria capturados por la cámara Clio2. Fuente: (a): A. Skemer *et al.* [33]. (b): V. Bailey *et al.* [34].

El desarrollo científico con el sistema MagAO ha generado resultados de gran calidad, alcanzando resoluciones cercanas al límite de difracción. Este sistema está en constante desarrollo, y el equipo MagAO se encuentra trabajando para modernizar el sistema, ya sea actualizando el detector Clio2, adquiriendo nuevos instrumentos ópticos para VisAO [1] o, en un futuro, trabajar en la mitigación de vibraciones.

VIBRACIONES EN MAGAO

El objetivo de este Capítulo es estudiar e identificar los efectos vibratorios presentes en las mediciones del sistema MagAO, a partir de datos reales capturados durante observaciones.

Se presentan los datos de observación astronómica con los cuales se basará el estudio del capítulo. Posteriormente, se describe el procesamiento realizado para analizar la presencia de vibraciones en las mediciones, comparando resultados de diferentes sesiones, como también de datos capturados bajo distintos estados del sistema. Finalmente, se obtienen resultados gráficos y cuantitativos de la presencia de vibraciones.

4.1. Datos Capturados

4.1.1. Sesión de Observación

El trabajo de investigación a presentar se ha iniciado en la sesión de observación del 31 de octubre de 2014 en el Telescopio Clay.

Se ha participado de esta noche de observación junto al Equipo MagAO. En esta oportunidad, el equipo ha sido comandado por Dr. Laird Close, trabajando conjuntamente con Dr. Jared Males y Dr. Katie Morzinski. El equipo realiza dos estadias anuales en el LCO, siendo ésta la visita 2014b (segundo semestre del año 2014). El 31 de octubre fue el quinto de cuarenta días de residencia del Equipo MagAO.

Durante dos noches de observación (30 y 31 de Octubre), fuimos invitados tres estudiantes de la Universidad Santa María (hemos formado un equipo junto a Sebastián Zúñiga y Mario Castro) a conocer las instalaciones, como preámbulo de la residencia en la Universidad de Arizona que se ha llevado a cabo tres meses después de la visita, entre enero y marzo del año 2015.

Las noches anteriores y durante la visita han sido “noches de ingeniería”, donde el principal objetivo no era todavía la obtención de imágenes científicas, sino la comprobación del funcionamiento correcto de los elementos del sistema MagAO y del lazo cerrado.

Previo a la noche de observación, ya se ha avanzado en el montaje del sistema. Ya han sido montados el espejo secundario deformable (ASM), la W-Unit en el puerto Nasmyth (NAS) y la cámara infrarroja Clio2 (ver Figura 4.1). Se ha comprobado el correcto funcionamiento del sistema y de los lazos de control involucrados a través del software especializado (ver Figura 4.2).

De esta forma, la noche del 31 de octubre, el sistema estaba listo para la captura de



Figura 4.1: Fotografía de proceso de montaje de cámara infrarroja Clio2 en puerto Nasmyth (NAS) del Telescopio Clay. Fuente: “2014b Day 5: Corrected Dispersion”, en <http://visao.as.arizona.edu>, 31 Oct. 2014.

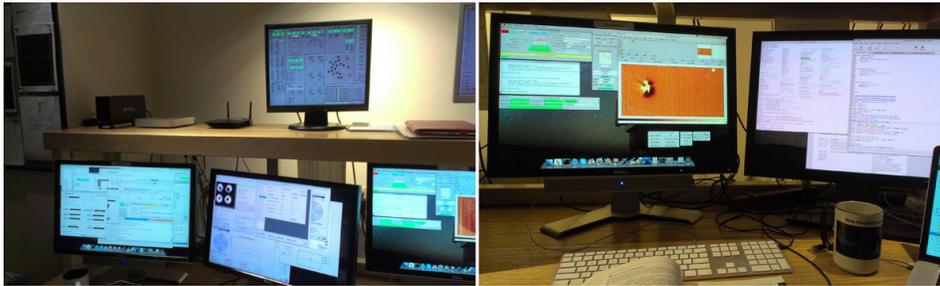


Figura 4.2: Fotografías de puesto de trabajo en Telescopio Clay. Fuente: “2014b Day 4: Closed Loop”, en <http://visao.as.arizona.edu>, 30 Oct. 2014.

datos deseada para posterior análisis frecuencial. Sin embargo, durante la segunda mitad de la noche, el sistema de corrección de dispersión atmosférica (ADC) sufrió descalibración, lo que detuvo el ritmo de trabajo. Afortunadamente, los datos que se alcanzaron a recopilar son suficientes para realizar el estudio objetivo de las vibraciones presentes en el sistema.

Durante esta sesión de observación, se ha almacenado información capturada por los sensores del instrumento MagAO, para posterior análisis frecuencial y detección de vibraciones en el sistema.

La información es obtenida desde la cámara científica VisAO [8] y el sensor de frente de onda piramidal (PWFS).

1. En el caso de VisAO, se registra el movimiento en los ejes X e Y del pixel de mayor brillo en la imagen capturada. El registro de la posición de la imagen detectada con la cámara CCD se ha realizado a una frecuencia de ~ 42 [Hz]. Estos datos serán nombrados como “Datos CCD”. Conociendo que cada pixel en la cámara CCD corresponde a una medida angular de 7.8 [mas], se dispone de datos CCD en unidades de [mas].
2. En el caso del PWFS, se registran las magnitudes relativas de los primeros 200 modos ortogonales de la descomposición del frente de onda. El lazo de control de óptica adaptativa funciona a una frecuencia de operación de ~ 990 [Hz]. Sin embargo, sólo

se capturan una de cada tres mediciones, por lo que se obtiene una frecuencia de muestreo de ~ 330 [Hz]. Estos datos serán nombrados como “Datos WFS”. Estos datos, a diferencia de los datos CCD, son adimensionales.

En un caso ideal, con el sistema de control funcionando a la perfección, y sin efectos de turbulencia atmosférica o de vibraciones en el sistema, los datos CCD capturados serían constantes (valor cero) en el eje X y eje Y, mientras que el frente de onda capturado en los datos WFS no contendrían magnitudes para los modos tip/tilt.

El movimiento del pixel de mayor brillo en la cámara, así como la magnitud en los modos tip/tilt detectada por el WFS, se debe al efecto del *seeing* atmosférico y de vibraciones en el sistema. El objetivo de control del sistema es reducir este efecto, a través de la acción del espejo deformable.

Cabe notar que una reducción en los efectos del *seeing* atmosférico o de vibraciones se reflejan en una disminución en la varianza de los datos. Por lo tanto, datos capturados con menor varianza indican menores efectos externos al frente de onda, o un mejor desempeño del sistema de control comandando el espejo deformable.

4.1.2. Tests de Captura

A lo largo de la sesión de observación en el Telescopio Clay, el sistema es sometido a distintas condiciones de operación. Durante cada una de estas configuraciones, se capturan datos simultáneamente de la cámara CCD y del WFS, por una duración de alrededor de un minuto en cada configuración. Estas sesiones de captura serán nombradas como “Tests de captura”. En total, se han recopilado datos de doce tests.

La Figura 4.3 presenta las varianzas de los datos CCD (eje X y eje Y) y de los datos WFS (modos tip y tilt) para cada uno de los doce tests de captura.

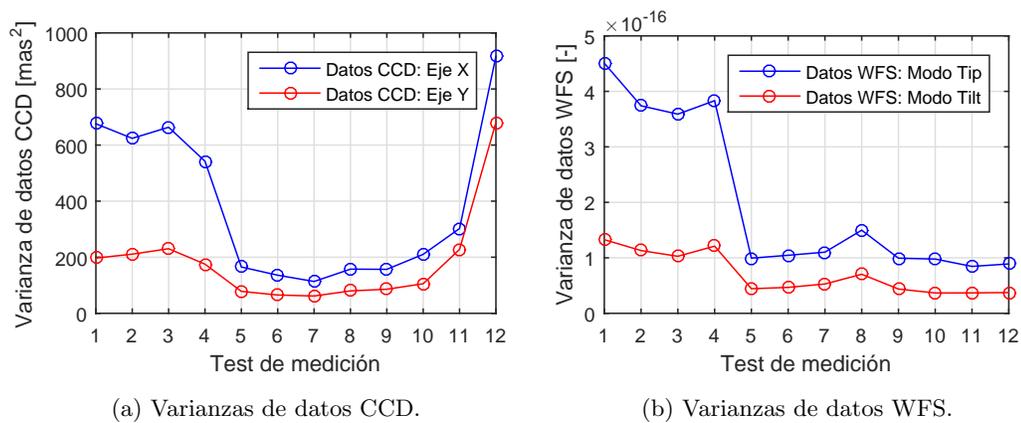


Figura 4.3: Varianzas de sets de datos temporales CCD y WFS, para cada test de captura.

A. Tests 1 a 4

En los cuatro primeros tests, se desea observar la influencia de tres elementos de la instrumentación del sistema: los ventiladores del espejo primario (Primary Fan), la bomba de enfriamiento del espejo primario (Primary Pump) y las persianas que rodean el domo del telescopio (Louvers). Las configuraciones de los instrumentos para cada test se detallan en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Tests de captura de datos en sesión de observación 2014b. Tests 1 a 4.

	Primary Fans	Primary Pump	Louvers
Test 1	Encendidos	Prendido	Abiertos
Test 2	Encendidos	Prendido	Cerrados
Test 3	Encendidos	Apagado	Cerrados
Test 4	Apagados	Apagado	Cerrados

B. Tests 5 a 8

El lazo de control de MagAO utiliza un controlador integrativo para comandar el espejo deformable. El sistema es capaz de optimizar la ganancia del controlador, para mejorar el desempeño del sistema.

Entre la captura de los Tests 4 y 5, la ganancia del controlador es optimizada. Se vuelven a comparar los efectos de los tres elementos testeados en los cuatro primeros tests. Las configuraciones de los instrumentos para cada test se detallan en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2: Tests de captura de datos en sesión de observación 2014b. Tests 5 a 8.

	Primary Fans	Primary Pump	Louvers
Test 5	Apagados	Apagado	Cerrados
Test 6	Encendidos	Apagado	Cerrados
Test 7	Encendidos	Prendido	Cerrados
Test 8	Encendidos	Prendido	Abiertos

Se puede observar el efecto de la optimización de ganancia del controlador en la reducción de las varianzas de los datos capturados durante los tests 5 a 8, con respecto a los cuatro tests de captura anteriores (Figura 4.3). Entonces, es posible considerar que el controlador optimizado mejora el desempeño del sistema de control.

C. Tests 9 y 10

A continuación, se testean dos elementos de menor impacto que los anteriores: los motores de traslación de la W-Unit (Bayside Stages) y los ventiladores de la cámara CCD (VisAO Fans). Las configuraciones de los instrumentos para cada test se detallan en la Tabla 4.3.

Cabe notar que para los Tests 1 a 8, los Bayside Stages y los VisAO Fans se han mantenido ambos encendidos. Por otra parte, para los Tests 9 y 10, los Primary Fans y el Primary Pump se encuentran apagados, y los Louvers se encuentran cerrados.

Tabla 4.3: Tests de captura de datos en sesión de observación 2014b. Tests 9 a 12.

	Bayside Stages	VisAO Fans
Test 9	Encendidos	Apagados
Test 10	Apagados	Encendidos

D. Tests 11 y 12

Originalmente, los Tests 11 y 12 cumplen el propósito de analizar la influencia de la pantalla de viento del domo (Windscreen).

Sin embargo, debido a condiciones climáticas que perjudicaron la precisión de las mediciones a lo largo de la noche de observación, como también a la gradual descalibración del sistema de corrección de dispersión atmosférica, los datos CCD captados durante estos tests poseen una varianza considerablemente mayor que los tests previos (Figura 4.3).

Se consideran poco confiables los datos CCD para poder cuantificar los datos WFS correspondientes. Luego, se escoge no considerar estos tests para el análisis vibratorio.

E. Test de Captura de Sesión 2014a

Adicionalmente a los 10 tests a analizar de la observación realizada en la visita 2014b, se dispone también de un set de datos CCD y datos WFS de la sesión de observación anterior, del 17 de Abril de 2014 (visita 2014a). Éstos son datos “all-off”, es decir, con la instrumentación de ventilación principal apagada. Luego, este test es comparable al test 5 detallado en la Tabla 4.2.

4.2. Densidades Espectrales de Potencia

Se dispone de alrededor de un minuto de información para cada test de medición, de los cuales se obtienen dos sets de datos de la cámara CCD (posiciones X e Y) y 200 registros provenientes del WFS, para los primeros 200 modos de operación. De ellos, sólo se analizan los dos primeros (modos tip/tilt), pues éstos son los modos turbulentos más energéticos y frecuentemente sólo ellos incluyen las perturbaciones adicionales causadas por vibraciones de la estructura del sistema.

Para generar un análisis frecuencial de estos datos, se obtienen Densidades Espectrales de Potencia (power spectral densities, PSDs) [35] a partir de la información temporal disponible.

Las PSDs permiten observar los componentes frecuenciales y sus significancias en la señal. Al tratarse de densidades de potencia, la potencia media asociada a cada frecuencia corresponde al valor de la integral de la PSD en una vecindad de ella. Cabe notar también que el valor de la integral de la PSD en todo su rango de frecuencias es la potencia media de la señal, que equivale a la varianza de los datos temporales originales. La equivalencia entre potencia media de los datos en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia es la interpretación conceptual del Teorema de Parseval [36].

El periodograma de una señal otoga una estimación para su PSD. Éste se obtiene a partir de la transformada rápida de Fourier (Fast Fourier Transform, FFT), y depende de

la frecuencia de captura y número de datos de la señal.

Un mejor método de estimación de PSD, que será empleado a lo largo de este Capítulo, es el método de Welch [37]. Éste consiste en la división de la información temporal en segmentos, y el promedio de los periodogramas obtenidos de cada uno de ellos, con el objetivo de reducción del ruido de la PSD resultante.

Los segmentos pueden ser o no solapados, y se suelen multiplicar por funciones ventana. La resolución y mitigación de ruido en la PSD a obtener depende de factores como el número de datos por segmento, el porcentaje de solapamiento y la función ventana a emplear. Como los datos capturados por MagAO son ruidosos, el método brinda una reducción de ruido que permite mejor análisis gráfico, a costo de resolución.

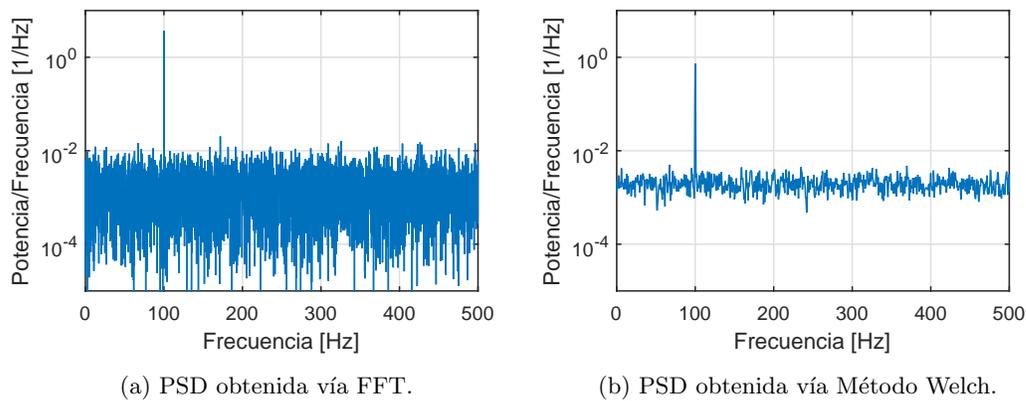


Figura 4.4: Comparación de PSDs obtenidas usando FFT y método de Welch. Se genera la PSD de una señal sinusoidal de amplitud 1 y frecuencia 100 [Hz], con ruido gausseano aditivo. El método de Welch empleado se ha configurado con 8 ventanas promediadas con 50% de solapamiento y ventanas Hamming (Ésta es la configuración por defecto de la función *pwelch* de *MATLAB*).

Las estimaciones de las PSDs de los datos CCD y WFS son obtenidas usando el estimador Welch, configurado con segmentos de 10 segundos de duración, con 50% de solapamiento y ventanas Hamming. A modo de ejemplo, se presentan los datos temporales (Figura 4.5a) y la estimación obtenida para las PSDs correspondientes (Figura 4.5b) empleando método Welch, para los modos tip/tilt de los datos WFS del Test 1.

La señal temporal capturada es altamente ruidosa. Sin embargo, analizando sus componentes frecuenciales en su PSD (Figura 4.5b), se observa que existen componentes de significancia mayor que otras, en distintos rangos de frecuencia. El análisis a presentar a continuación se concentra en la presencia de máximos de frecuencia en las PSDs a obtener, identificando posibles causas de su origen, y midiendo la potencia media asociada.

4.2.1. Normalización de PSDs

Es de interés poder medir las PSDs obtenidas, como también la presencia de componentes vibratorios, en unidades conocidas. Específicamente, se usa la medida de la raíz de la

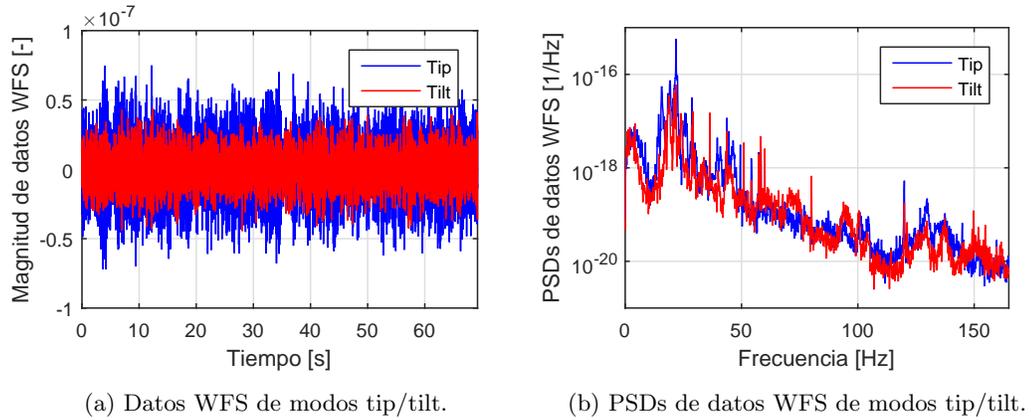


Figura 4.5: Datos WFS en tiempo, y PSD obtenida. Test 1.

potencia integrada, también denominada el valor RMS, en unidades angulares de [mas]. El valor RMS se obtiene calculando la raíz del área bajo la curva en la PSD, en una vecindad de la frecuencia de interés.

Como los datos CCD (movimiento en eje X e Y) están dados en unidades [mas], las PSDs resultantes de los datos CCD se miden en unidades de [mas²/Hz]. La Figura 4.6 presenta la PSD de los datos CCD correspondientes al Test 5.

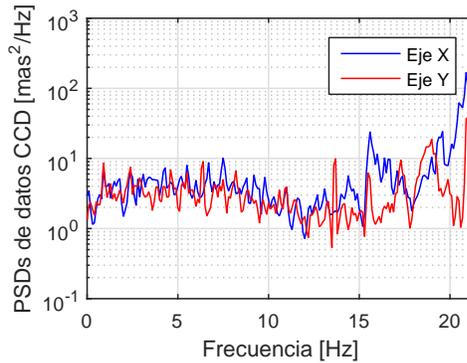


Figura 4.6: PSDs obtenidas de mediciones de Test 5 (Tabla 4.2) para datos CCD.

Por otro lado, los datos WFS son magnitudes relativas de la descomposición del frente de onda, por lo que no poseen asociación a unidades físicas. Entonces, un proceso de normalización es necesario para obtener PSDs de los datos WFS en unidades de [mas²/Hz].

A. Estrategia Previa de Normalización

El equipo MagAO ha realizado análisis frecuencial de los datos capturados de la sesión 2014a, en base a la obtención de PSDs. Éste resultado es presentado en la Figura 4.9 (Sección 4.3.1).

Para normalizar los datos WFS, se han amplificado las PSDs de datos WFS de modo de obtener el mismo valor RMS de las PSDs de datos CCD, dentro de un rango de 15 a 21 [Hz]. Se asume que este rango de frecuencias no está sujeto a efectos de aliasing, mientras que frecuencias menores si lo están.

La Figura 4.7 presenta el resultado normalizado para los datos WFS siguiendo este método de normalización.

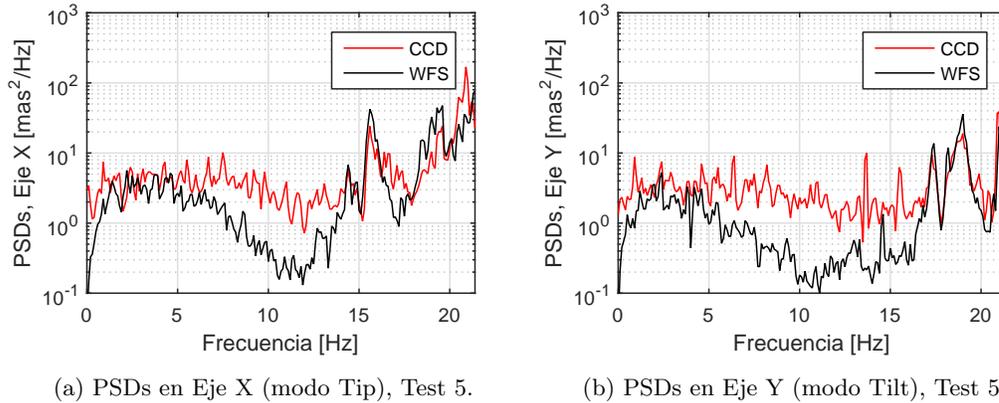


Figura 4.7: PSDs medidos para datos CCD y datos WFS, empleando estrategia previa de normalización.

Esta estrategia de normalización ha sido empleada en las publicaciones [16] [17].

B. Estrategia Nueva de Normalización

Para el análisis a desarrollar en el presente trabajo, se escoge una estrategia distinta para normalizar los datos WFS. En esta estrategia, se determina que las PSDs de los datos CCD están sujetas a aliasing en todas sus frecuencias.

Esto se puede comprobar interpolando los datos WFS de forma de simular una captura a la frecuencia de muestreo de los datos CCD. La distribución de potencia a lo largo de la banda de 0 a 21 [Hz] para las PSDs de los datos WFS interpolados es muy similar a la observada en las PSDs de los datos CCD. Entonces, se normalizan los datos WFS amplificándolos de forma de igualar valor RMS de los datos CCD.

El resultado presentado en la Figura 4.8 sugiere que ésta es una mejor alternativa de normalización, comparando con el resultado de la Figura 4.7. Esto se puede corroborar conociendo que el error RMS entre ambas curvas se ha reducido de 13.83 a 4.04 en el Eje X, y de 3.66 a 1.80 en el Eje Y, usando el nuevo método de normalización.

Por lo tanto, se determina que la forma de normalizar los datos WFS es a través de la amplificación de los datos WFS, para obtener un mismo valor RMS en las PSDs de los datos CCD y los datos WFS interpolados.

Este proceso es equivalente a igualar la potencia promedio de ambas señales, lo que se reduce a amplificar los datos WFS para igualar la varianza de los datos CCD, producto del Teorema de Parseval [36].

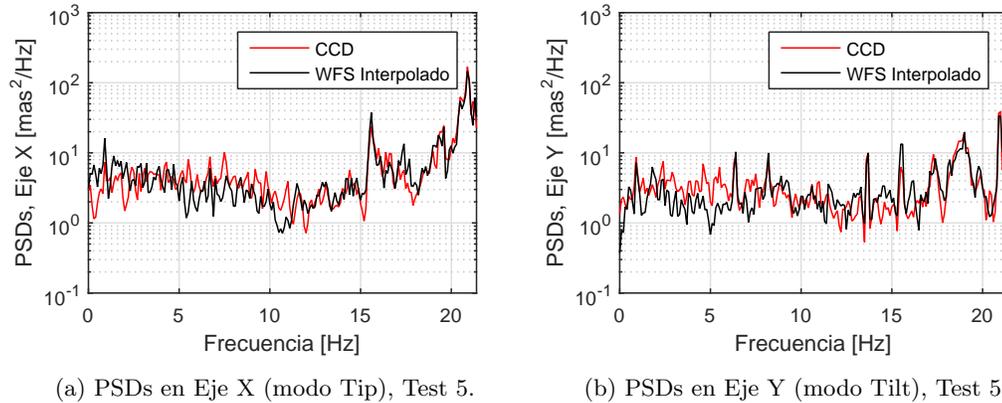


Figura 4.8: PSDs medidos para datos CCD y datos WFS, empleando estrategia nueva de normalización.

Resultados de la estrategia nueva de normalización han sido presentados en [18].

Los resultados numéricos en este trabajo de Tesis, y en [18], difieren de los anteriormente publicados en [16] [17].

4.3. Vibraciones en MagAO

Se disponen de PSDs normalizadas para los datos CCD y WFS disponibles.

- Un par de datos CCD (ejes X e Y) y un par de datos WFS (modos tip/tilt) de la sesión de observación 2014a, adquiridos la noche del 17 de abril de 2014.
- Doce pares de datos CCD y doce pares de datos WFS de la sesión de observación 2014b, adquiridos la noche del 31 de octubre de 2014. Los doce pares de datos corresponden a los doce tests introducidos en la Sección 4.1.2.

A continuación, se presenta el análisis frecuencial realizado en base a las PSDs obtenidas de los datos capturados disponibles. Este estudio se presenta en las siguientes categorías.

1. Análisis de PSD de sesión de observación 2014a.

Se compara el resultado obtenido previamente por el Equipo MagAO con el resultado obtenido actualmente usando el mismo set de datos.

2. Análisis de PSD de sesión de observación 2014b.

Se observa el contenido frecuencial de los datos obtenidos durante el Test 5, pues usa la ganancia optimizada para el controlador, y además corresponde al estado “all-off”, al igual que los datos 2014a. Este resultado no sólo es comparado con el obtenido de los datos 2014a, sino también se observan los máximos de vibración presentes. Estas vibraciones serán nombradas como “Vibraciones Inherentes”, pues están presentes en todos los tests de captura.

3. Análisis del efecto de la reoptimización de ganancia.

Los Tests 1, 2, 3 y 4 comparten la configuración de la instrumentación con respecto a los Tests 8, 7, 6 y 5, respectivamente. El análisis de la diferencia entre las PSDs obtenidas de cada par de tests, observada a través del cálculo del cociente entre PSDs, permite conocer cómo la optimización de ganancia influye en las magnitudes de potencia asociada a distintas frecuencias.

4. Identificación de vibraciones inducidas por instrumentos.

Empleando los Tests 5 a 10, se observa y se mide si el encendido de la instrumentación descrita en la Sección 4.1.2 genera alguna diferencia en las PSDs de los datos correspondientes. Las vibraciones inducidas por instrumentos se identifican observando máximos de frecuencia presentes cuando el instrumento está en funcionamiento, y no presente con el instrumento apagado. Éstas vibraciones serán nombradas como “Vibraciones Adicionales”.

4.3.1. PSD de Sesión de Observación 2014a

La Figura 4.9 presenta el análisis hecho por el equipo MagAO de las PSDs obtenidas de la sesión de observación 2014a. Cabe notar que se observan máximos locales a lo largo de la PSD. A lo largo de este documento, estos máximos serán denominados “peaks” vibratorios.

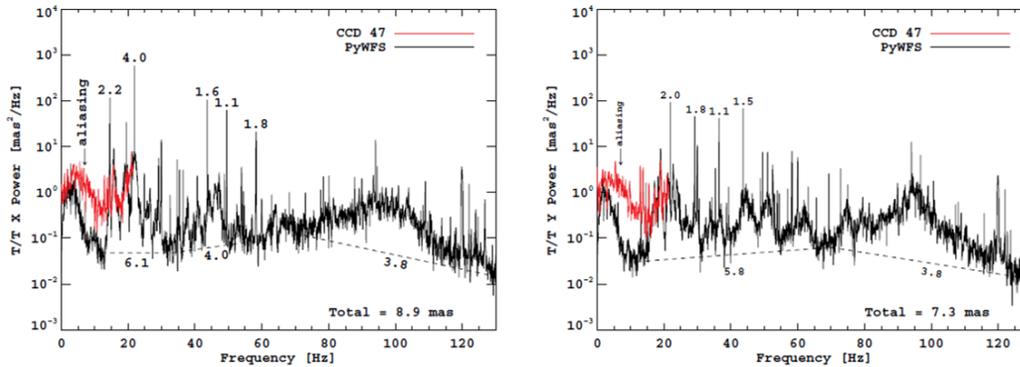


Figura 4.9: PSDs de datos CCD y WFS, capturados durante la sesión 2014a, obtenidas por el Equipo MagAO. PSDs de datos WFS son normalizados siguiendo la estrategia previa, descrita en la Sección 4.2.1. Los peaks son etiquetados con su valor RMS en [mas]. Valor RMS total de la señal es indicado. El área entre las PSDs y una estimación continua es indicada. Cortesía: Jared Males.

Usando como base el resultado gráfico de la Figura 4.9, se obtienen las PSDs de los datos CCD y WFS de la sesión 2014a. Al igual que el resultado obtenido por el equipo MagAO, los datos WFS son normalizados siguiendo la estrategia previa de normalización descrita en la Sección 4.2.1. De esta forma, se obtiene el resultado de la Figura 4.10.

Es posible observar que los valores RMS de los peaks indicados en la Figura 4.10 son comparables a los obtenidos por el análisis del equipo MagAO (Figura 4.9). Esto corrobora

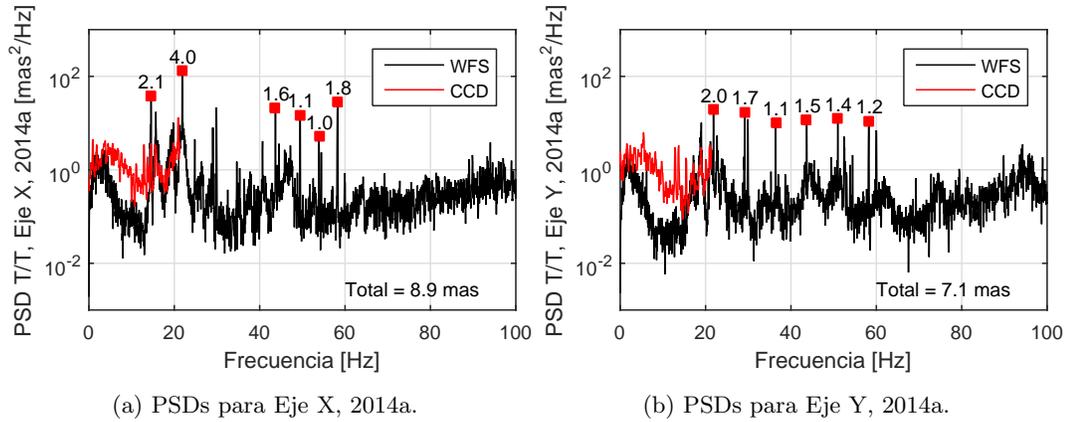


Figura 4.10: PSDs de datos CCD y WFS capturados durante sesión 2014a. PSDs de datos WFS son normalizados siguiendo la estrategia previa, descrita en la Sección 4.2.1. Los peaks son etiquetados con su valor RMS en [mas]. Valor RMS total de la señal es indicado.

la correcta obtención de PSDs a partir de los datos adquiridos.

En adelante, se usará la estrategia nueva de normalización de datos WFS, descrita en la Sección 4.2.1. Por lo tanto, los resultados numéricos difieren de los presentados en la Figura 4.10. Los nuevos valores RMS son presentados en la Figura 4.11.

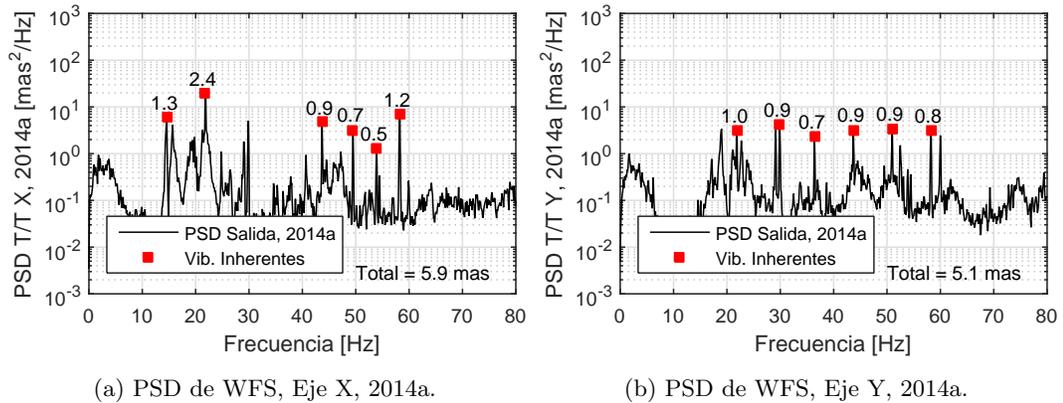


Figura 4.11: PSDs de datos CCD y WFS capturados durante sesión 2014a. PSDs de datos WFS son normalizados siguiendo la estrategia nueva, descrita en la Sección 4.2.1. Los peaks son etiquetados con el valor RMS en [mas]. Valor RMS de la señal completa es también indicado.

El nuevo método de normalización genera valores RMS menores a los presentados en la Figura 4.10. Esto significa que la potencia promedio presente en las señales capturadas es menor a la estimada por el equipo MagAO.

4.3.2. PSD de Sesión de Observación 2014b

Se sabe que los datos disponibles de la sesión 2014a son datos “all-off”, esto es, tomados con los instrumentos adicionales apagados. Por lo tanto, el set de datos de la sesión 2014b que está más apto para ser comparado con los de la sesión 2014a es el set de datos del Test 5.

Empleando el mismo procedimiento usado para obtener los resultados gráficos de la Figura 4.11, se generan las PSDs correspondientes a los datos del Test 5. Este resultado se presenta en la Figura 4.12.

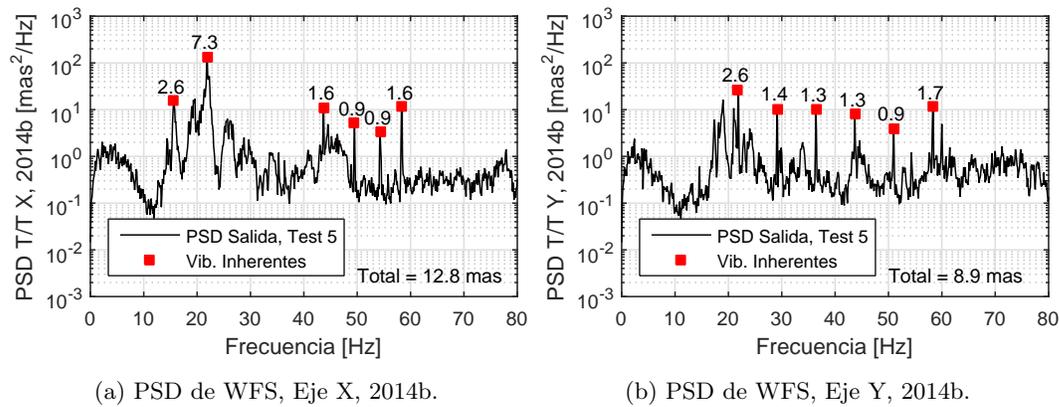


Figura 4.12: PSDs de datos CCD y WFS capturados durante sesión 2014b (Test 5). Los peaks son etiquetados con el valor en [mas] de la raíz de la potencia integrada.

La raíz de la potencia integrada en las PSDs de los datos WFS de la sesión 2014b tienen valores de 13.0 [mas] y 9.1 [mas] para los ejes X e Y, respectivamente. Estos valores son superiores a los obtenidos de la sesión 2014a, los que son 5.8 [mas] y 5.1 [mas] para los ejes X e Y, respectivamente.

Esta diferencia se atribuye a que las mediciones de abril fueron registradas bajo mejores condiciones climáticas (*seeing* de ~ 0.6 [arcsec] y velocidad media de viento de ~ 18 [mph]) con respecto a las mediciones de octubre (*seeing* de ~ 0.8 [arcsec] y velocidad media de viento de ~ 22 [mph]).

Sin embargo, independiente de estas condiciones, es evidente que los peaks en las PSDs coinciden en ambas noches de observación. Esto es evidencia de la existencia de vibraciones inherentes en el sistema causadas por factores de la instrumentación, y no por efectos particulares a cada sesión de observación.

De forma preliminar, varios de los peaks de vibración se pueden atribuir a factores como la frecuencia de resonancia del telescopio o la red eléctrica.

1. En los datos del Eje Y, varios de los peaks de vibración son equidistantes entre sí. Se descubre que ellos son múltiplos del valor de frecuencia de 7.28 [Hz]. Por lo tanto, se atribuyen a armónicos de la frecuencia de resonancia del telescopio [5].
2. Se observan peaks de vibración cercanos a las frecuencias de 60 [Hz] y de 120 [Hz]. Éstos

se atribuyen al efecto de la red eléctrica del observatorio, pues en sus instalaciones se usa la red norteamericana de 110 [V] y 60 [Hz].

3. Las barras que sostienen el espejo secundario, que lo establecen en su posición, llevan el nombre de *vain ends*. Se sospecha que éstos atribuyen con vibraciones de alta frecuencia, específicamente, en anchos de banda entre los 130 [Hz] y los 160 [Hz].

Como los datos WFS son capturados a una frecuencia de 330 [Hz], las PSDs otorgan información hasta los 165 [Hz]. Las PSDs de los modos tip/tilt de los datos WFS para el Test 5, en todo el rango de frecuencias que los datos permiten analizar, se presentan en la Figura 4.13, indicando posibles fuentes de vibraciones inherentes.

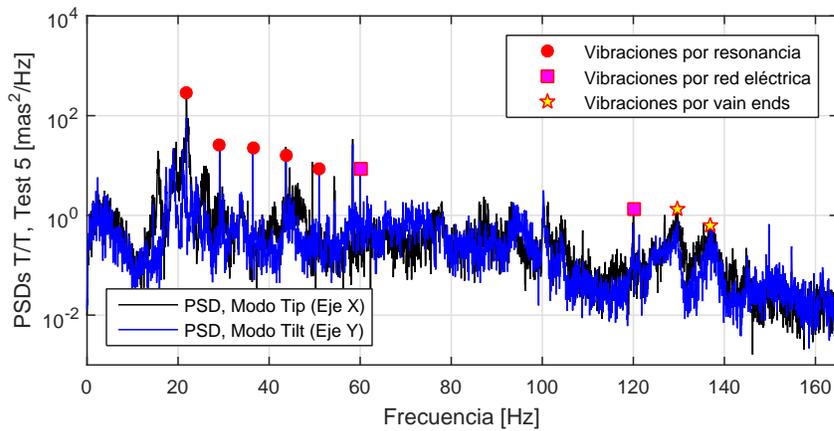


Figura 4.13: PSDs de modos tip/tilt de datos WFS, para el Test de captura 5. Se pueden identificar las vibraciones inherentes atribuidas a resonancia del telescopio (múltiplos de 7.28 [Hz]), red eléctrica (cerca de 60 y 120 [Hz]) y *vain ends* (entre 130 y 160 [Hz]).

4.3.3. Optimización de Ganancia de Lazo Cerrado

Como se ha mencionado en la sección 4.1.2, desde el Test 5 en adelante, la ganancia del controlador es optimizada. El controlador del lazo de control de MagAO se asume integrativo, pero su naturaleza exacta, y los valores específicos de ganancia usados en las observaciones, son desconocidos.

El objetivo de esta sección es de analizar el efecto de la optimización de ganancia de lazo cerrado, a través de la comparación de PSDs de los datos WFS antes y después de la optimización, y el valor RMS de las señales.

La Figura 4.14 presenta las PSDs de los datos WFS correspondientes al Eje X para los Tests 4 y 5. Se usan este par de datos pues entre estos tests de captura sólo ha cambiado la ganancia del controlador, no el estado de los instrumentos.

Existe una reducción en la potencia media para frecuencias bajas y un aumento para frecuencias altas, estando el punto de inflexión cerca de los 50 [Hz]. Este comportamiento es también observado comparando los otros tres pares de tests con igual estado de instrumentos y distinta ganancia de controlador.

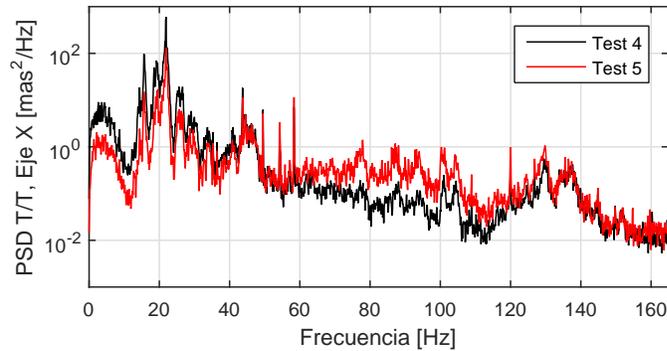


Figura 4.14: PSDs de test previo (test 4) y posterior (test 5) a la reoptimización de la ganancia a lazo cerrado. Eje X, datos WFS.

Se puede observar de forma gráfica la razón entre las magnitudes obtenidas en las PSDs para cada par de datos que difieren en la ganancia del controlador. El resultado de la razón entre las PSDs de ganancia optimizada y su contraparte con ganancia previa se presentan en la Figura 4.15.

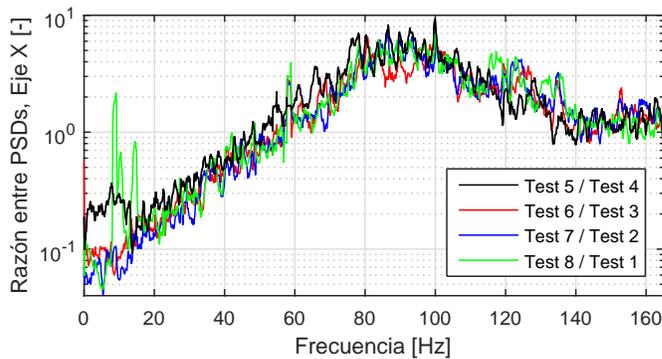


Figura 4.15: Razón entre PSDs de tests con ganancia optimizada y tests con ganancia previa.

Se observa de la Figura 4.15 que efectivamente, el valor de la PSD para datos con ganancia optimizada disminuye para frecuencias bajas (menores que 50 [Hz], aproximadamente), mientras que aumenta para frecuencias altas.

Por el resultado presentado en la Figura 4.3 (Sección 4.1.2), existe reducción de varianza una vez optimizado el lazo, lo que indica un mejor desempeño del lazo de control.

La Tabla 4.4 presenta el valor RMS calculado a partir de las PSDs para los tests 1 al 8.

Se comprueba así que la nueva ganancia genera una respuesta temporal de menor varianza, efecto beneficioso para el funcionamiento del lazo cerrado.

Tabla 4.4: Valores RMS de PSDs de datos WFS para Tests 1 a 8. Valores RMS son indicados en formato X/Y, donde X corresponde al valor RMS del Eje X, y de igual forma para el Eje Y. Valores RMS son presentados en unidades de [mas]. Cada columna contiene el par de tests que llevan la misma configuración de instrumentación.

	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4
Ganancia Previa	39.59 / 17.84	32.39 / 18.06	38.61 / 16.63	36.14 / 17.85
	Test 8	Test 7	Test 6	Test 5
Ganancia Reoptimizada	18.79 / 14.01	16.58 / 13.30	19.73 / 12.56	23.27 / 14.10

4.3.4. Identificación de Fuentes de Resonancia

A continuación, se utilizan las PSDs normalizadas del WFS de los tests 5 a 10 (Tablas 4.2 y 4.3) para analizar la influencia de la instrumentación del sistema en los componentes frecuenciales observados.

Recapitulando la información presentada en las Tablas 4.2 y 4.3, los tests 5 a 10 permiten analizar el efecto de cinco elementos de la instrumentación que forma parte del sistema del Telescopio Clay: los ventiladores del espejo primario (Primary Fan), la bomba de enfriamiento del espejo primario (Primary Pump), las persianas que rodean el domo del telescopio (Louvers), los ventiladores de la cámara CCD (VisAO Fans) y los motores de traslación de la W-Unit (Bayside Stages). El estado de los instrumentos durante los seis tests se detallan en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5: Estado de elementos del sistema durante cada test. La información presentada es equivalente a la introducida en las tablas 4.2 y 4.3. Los colores de cada fila corresponden a los colores de las curvas en la Figura 4.16.

	Primary Fans	Primary Pump	Louver	VisAO Fans	Bayside Stages
Test 5	Apagado	Apagado	Cerrado	Encendido	Encendido
Test 6	Encendido	Apagado	Cerrado	Encendido	Encendido
Test 7	Encendido	Encendido	Cerrado	Encendido	Encendido
Test 8	Encendido	Encendido	Abierto	Encendido	Encendido
Test 9	Apagado	Apagado	Cerrado	Apagado	Encendido
Test 10	Apagado	Apagado	Cerrado	Encendido	Apagado

La Figura 4.16 presenta las 12 PSDs de los modos tip/tilt del WFS.

Desde la comparación gráfica, se identifican frecuencias de vibración causadas por instrumentación del sistema. Ya que las PSDs están normalizadas, es posible adquirir resultados numéricos de los máximos de frecuencia a través del cálculo de la raíz de la potencia integrada, con los elementos activados y desactivados. De esta forma, se puede medir la contribución de las vibraciones en la señal total.

En este análisis, se observan específicamente los peaks de frecuencia que están presentes en los tests con el instrumento a analizar en funcionamiento, y no en los test donde el instrumento no está presente. Aquellos máximos de frecuencia presentes en todos los casos

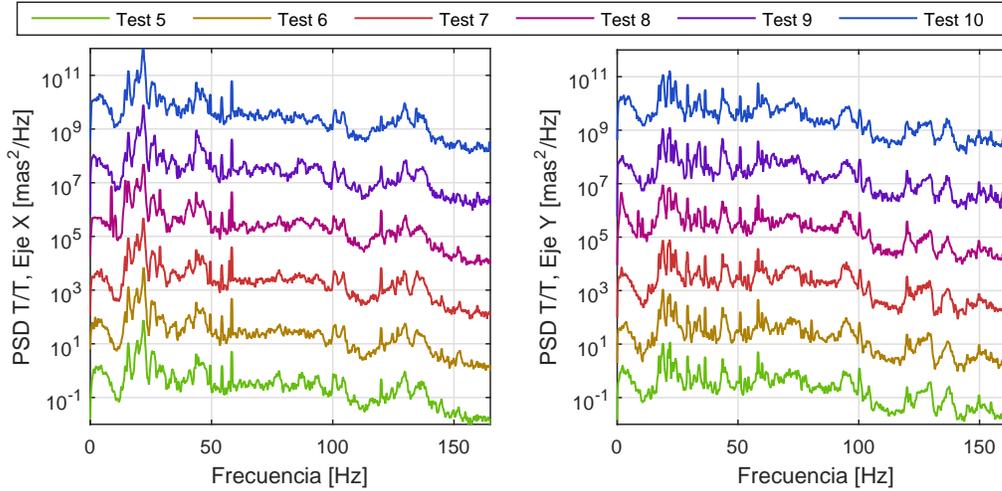


Figura 4.16: PSDs normalizadas de los modos tip/tilt de datos WFS, adquiridos durante tests 5 a 10 (ver Tabla 4.5). Los tests 5 a 10 son graficados de abajo hacia arriba, y los colores de las curvas corresponden a los colores de las filas en la Tabla 4.5. Los tests 6 a 10 son desplazados en el eje vertical con propósito comparativo.

son vibraciones inherentes al sistema y han sido descritas en la sección 4.3.2.

A. Efecto de Primary Fans

Comparando resultados de los tests 5 y 6, se analiza el efecto de la Celda de Ventilación del Espejo Primario en las PSDs resultantes.

Se calcula la razón entre las PSDs de los datos WFS de los tests 6 y 5, suavizando la curva del test 5 para contrarrestar efectos de ruido. De esta forma, los peaks vibratorios que se originan en el test 6 y no están presentes en el test 5 son aquellos con los mayores valores del cociente. Así, se identifican las vibraciones causadas por los Primary Fans.

Se obtiene el gráfico del cociente entre PSDs y se identifican los peaks de vibración. Se presenta este resultado en la Figura 4.17, marcando en ésta el peak de vibración detectado.

Se observa que, para el caso de los Primary Fans, existe un peak de vibración en la PSD asociada al Eje Y, a una frecuencia de 80.5 [Hz]. Detalle de este peak se presenta en la Figura 4.18.

Para medir el valor RMS que aporta esta vibración, se calcula el área bajo la curva en una vecindad de la frecuencia vibratoria en el test 5 (que no posee la vibración) y test 6 (que sí la posee). La raíz de la diferencia entre ambos valores es el valor RMS aportado por la vibración. Integrando en un rango de $\Delta f = 1[Hz]$ (es decir, desde 80 [Hz] hasta 81 [Hz]), se obtiene un valor RMS de 0.43 [mas] para el test 5 y de 0.68 [mas] para el test 6. Por lo tanto, esta vibración contribuye con un valor RMS de 0.53 [mas]. Este valor es indicado en la Figura 4.18.

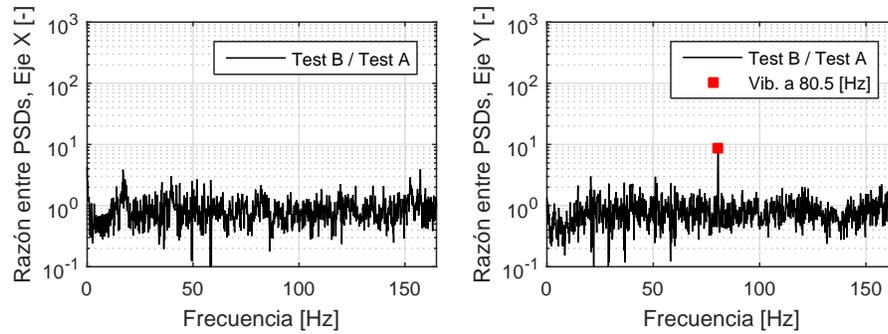


Figura 4.17: Identificación de vibraciones causadas por Primary Fans, a través de cociente entre PSDs de tests 6 y 5.

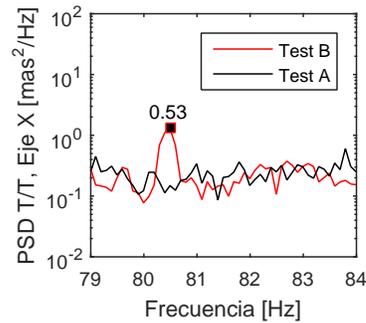


Figura 4.18: Vibraciones causadas por Primary Fans en PSDs de Eje Y.

B. Efecto de Primary Pump

Comparando resultados de los tests 6 y 7, se analiza el efecto de la Bomba de Refrigeración de Espejo Primario. De la misma forma que el caso anterior, se detectan las frecuencias que presentan peaks de vibración en el test 7.

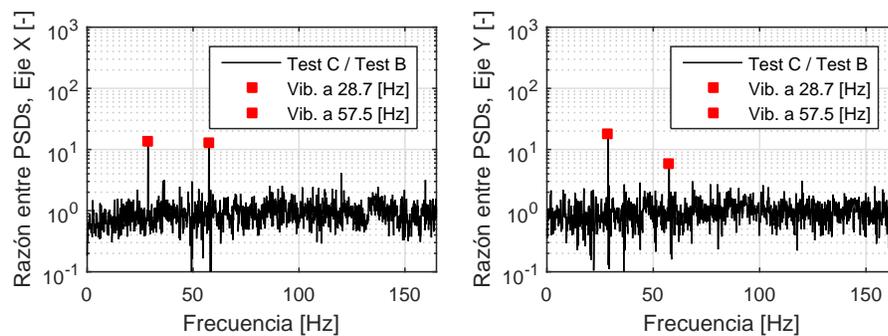


Figura 4.19: Identificación de vibraciones causadas por Primary Pump, a través de cociente entre PSDs de tests 7 y 6.

En este caso, como se puede observar en la Figura 4.19, existen peaks de vibración en ambos ejes. Se presentan las PSDs de los tests 6 y 7 en una vecindad de las posibles frecuencias de vibración para el eje X (Figura 4.20) y el eje Y (Figura 4.21)-

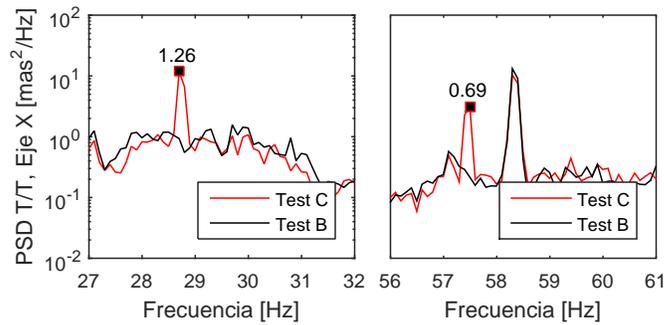


Figura 4.20: Vibraciones causadas por Primary Pump en PSDs de Eje X.

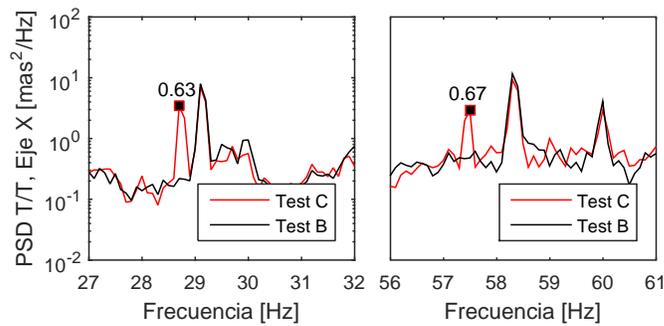


Figura 4.21: Vibraciones causadas por Primary Pump en PSDs de Eje Y.

Cabe destacar que los dos peaks de vibración encontrados corresponden a las frecuencias 28.7 [Hz] y 57.5 [Hz]. El segundo peak de vibración se atribuye a un armónico del primero, pues corresponde al doble de su frecuencia. La diferencia se atribuye a la baja resolución del método Welch empleado en la estimación de PSDs.

C. Efecto de Louvers

Comparando resultados de los tests 7 y 8, se analiza el efecto de las persianas del domo.

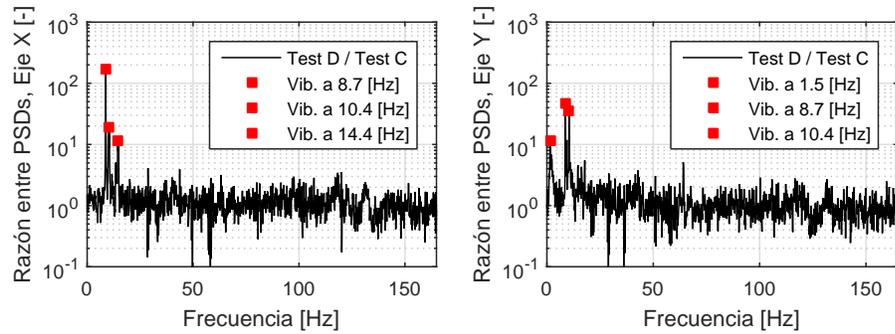


Figura 4.22: Identificación de vibraciones causadas por Louvers, a través de cociente entre PSDs de tests 8 y 7.

El efecto de Louvers es el más significativo entre la instrumentación analizada, lo que se puede ver en la Figura 4.22, como también en los valores RMS asociados a los peaks de vibración presentados en las Figuras 4.23 y 4.24.

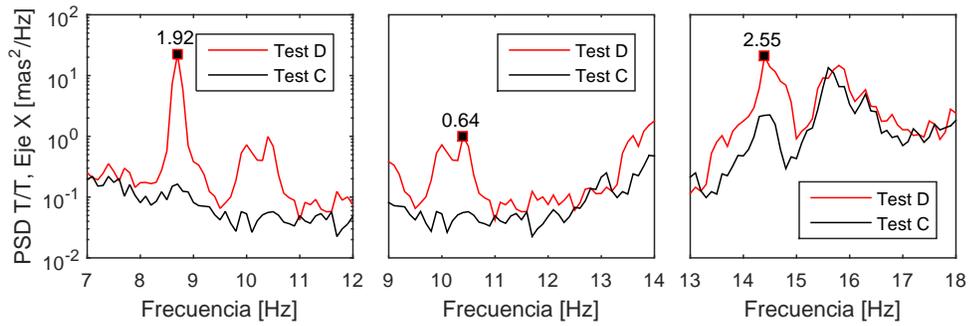


Figura 4.23: Vibraciones causadas por Louvers en PSDs de Eje X.

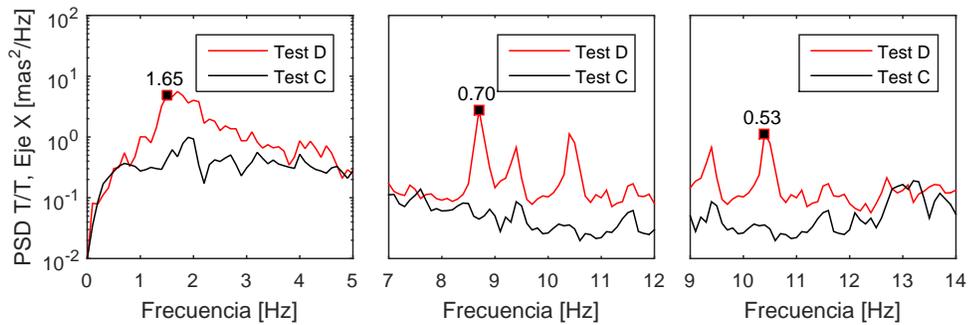


Figura 4.24: Vibraciones causadas por Louvers en PSDs de Eje Y.

D. Efecto de VisAO Fans

Comparando resultados de los tests 5 y 9, se analiza el efecto de los ventiladores de la cámara CCD.

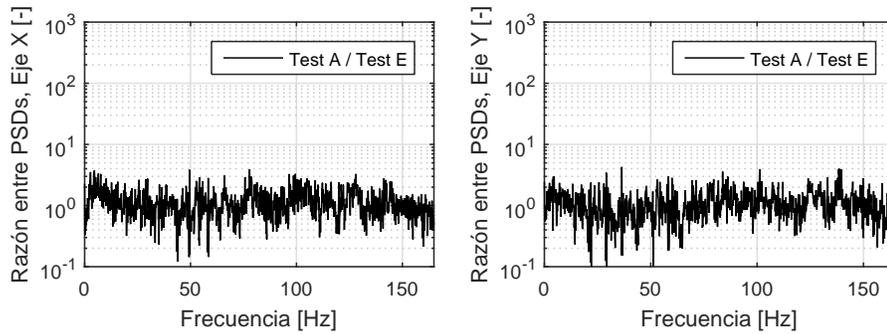


Figura 4.25: Identificación de vibraciones causadas por VisAO Fans, a través de cociente entre PSDs de tests 9 y 5.

Como se observa en la Figura 4.25, no se presentan peaks de vibración bajo el efecto de los VisAO Fans.

E. Efecto de Bayside Stages

Comparando resultados de los tests 5 y 10, se analiza el efecto de los motores de traslación de la W-Unit.

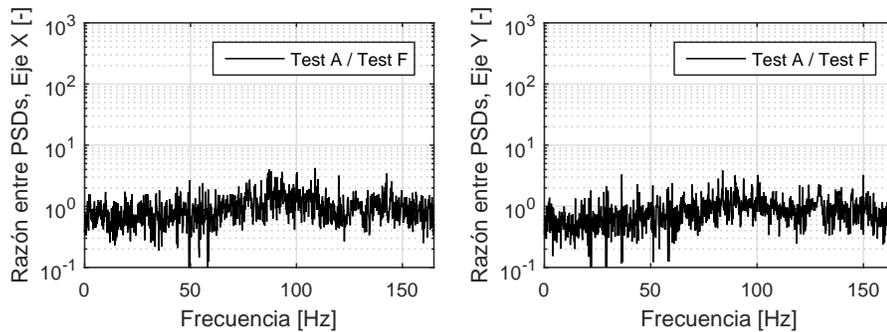


Figura 4.26: Identificación de vibraciones causadas por Bayside Stages, a través de cociente entre PSDs de tests 10 y 5.

Como se observa en la Figura 4.26, no se presentan peaks de vibración bajo el efecto de los Bayside Stages.

F. Vibraciones Adicionales Detectadas

Se han identificado vibraciones adicionales inducidas por la instrumentación de ventilación. El detalle de la potencia media asociada a estas vibraciones se presenta en la Tabla

4.6.

Tabla 4.6: Detalle de vibraciones adicionales inducidas por instrumentos.

Instrumento	Frecuencia	Eje	Valor RMS
Primary Fans	80.5 [Hz]	Y	0.53 [mas]
Primary Pump	28.7 [Hz]	X	1.26 [mas]
Primary Pump	57.5 [Hz]	X	0.69 [mas]
Primary Pump	28.7 [Hz]	Y	0.63 [mas]
Primary Pump	57.5 [Hz]	Y	0.67 [mas]
Louvers	8.7 [Hz]	X	1.92 [mas]
Louvers	10.1 [Hz]	X	0.64 [mas]
Louvers	14.8 [Hz]	X	2.55 [mas]
Louvers	1.7 [Hz]	Y	1.65 [mas]
Louvers	8.7 [Hz]	Y	0.70 [mas]
Louvers	10.4 [Hz]	Y	0.53 [mas]

4.4. Resumen del Capítulo

El sistema de óptica adaptativa MagAO, en condiciones climáticas adecuadas y bajos niveles de *seeing*, es capaz de obtener imágenes científicas de resolución cercana a los 20 [mas]. Por lo tanto, es necesario tener en cuenta la influencia de vibraciones en el funcionamiento del lazo de control, pues tienen el potencial de contribuir perjudicialmente en el resultado científico.

Para la noche de la sesión 2014a, las condiciones climáticas y de *seeing* fueron suficientemente adecuadas para alcanzar un valor RMS de vibraciones del sistema de 5.8 [mas] y 5.1 [mas] (modos tip/tilt). La meta que se ha fijado el equipo MagAO es la de alcanzar un valor de 4 [mas] para las vibraciones. Por lo tanto, el valor obtenido sugiere un buen funcionamiento de MagAO, destacando también que un sistema de mitigación de vibraciones permitiría alcanzar o superar esta meta.

Por otro lado, las condiciones desfavorables a las que estuvo sujeta la noche de la sesión 2014b generaron vibraciones con un valor RMS total de 13.0 [mas] y 9.1 [mas] (modos tip/tilt). Vibraciones de esta magnitud dificultan la obtención de resoluciones de 20 [mas] para las cuales MagAO está diseñado.

Un proceso importante en la reducción de potencia de efectos vibratorios es la correcta optimización del controlador en el lazo cerrado. La reoptimización de ganancia llevada a cabo durante la sesión ha beneficiado directamente a la reducción del efecto de vibraciones.

El análisis realizado también da a conocer que existen efectos vibratorios inherentes al sistema, como también vibraciones adicionales causadas por diferentes instrumentos del telescopio. Es de utilidad conocer de forma cuantificada la influencia que pueden generar estos instrumentos en el resultado científico del sistema, pues en un futuro diseño de mitigación de vibraciones, se podrían prever estos efectos y contrarrestarlos.

La base del trabajo aquí presentado ha sido desarrollado durante una estadía en la

Universidad de Arizona entre enero y marzo del año 2015, la cual ha generado los papers [16] y [17], presentados en la conferencia OSA Imaging and Applied Optics Congress 2015 en Arlington, Virginia, USA.

Una vez identificados los efectos vibratorios en la información capturada por los sensores de MagAO, el paso siguiente es el de diseñar un sistema de mitigación de estas vibraciones. Para ello, es necesario obtener un modelo para el sistema MagAO, así como también para la fase incidente, bajo el efecto de turbulencia atmosférica y vibraciones del sistema. A partir del modelo, es posible proponer un sistema de control que tome en cuenta la presencia de vibraciones en el lazo y las contrarreste. Un correcto diseño de controlador debe brindar suficiente reducción del efecto vibratorio para poder aprovechar la capacidad del sistema MagAO en obtener imágenes científicas de alta resolución.

MODELADO DE LAZO DE ÓPTICA ADAPTATIVA

En el presente capítulo, se describe el problema de modelado de un lazo de control de óptica adaptativa (AO), sujeto a vibraciones. En primer lugar, se presentan las nociones preliminares de diseño para un modelo de lazo de control de óptica adaptativa, citando autores que han estudiado este problema previamente, o aplicado a otros sistemas de AO. Luego, se aplican estos métodos para obtener un modelo para el lazo del sistema MagAO, así como también un modelo para la fase incidente, basados en el análisis vibratorio desarrollado en el Capítulo 4.

5.1. Modelado de un Sistema de Óptica Adaptativa

Para modelar un sistema de óptica adaptativa, es necesario tener presente los elementos fundamentales que lo describen: el sensor de frente de onda (WFS), el espejo deformable (DM) y el sistema de control.

- Sensor de Frente de Onda.

El WFS tiene como entrada la fase contenida en el frente de onda del haz incidente. Como éste corresponde al haz ya reflejado en el espejo deformable, se denomina fase residual y se denota por φ^{res} . La fase del haz capturado por el telescopio se denomina la fase incidente φ , mientras que la corrección de fase llevada a cabo por el espejo deformable está dada por la fase corregida φ^{cor} . Entonces, φ^{res} se define por

$$\varphi^{res} = \varphi - \varphi^{cor} \quad (5.1.1)$$

La salida y del WFS corresponde a la estimación del frente de onda, y se modela sujeta a ruido de medición w (Figura 5.1).

Los datos capturados y analizados en el Capítulo 4 corresponden a datos de la salida y del WFS.

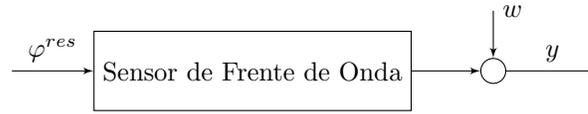


Figura 5.1: Diagrama de bloque Sensor de Frente de Onda

- Espejo Deformable.

El DM tiene como entrada los comandos que definen posiciones para los pistones que deforman el espejo. Esta actuación se denota por u . La salida del DM corresponde a la fase de corrección φ^{cor} a la que el haz incidente se somete al ser reflejado en el espejo (Figura 5.2).



Figura 5.2: Diagrama de bloque Espejo Deformable

- Controlador

Observando la salida y (estimación del frente de onda), el controlador debe ser capaz de computar la actuación u necesaria para que la fase de corrección φ^{cor} contrarreste la fase del haz incidente, reduciendo la varianza de la fase residual φ^{res} (Figura 5.3).



Figura 5.3: Diagrama de bloque Controlador

Renombrando los bloques Sensor de Frente de Onda, Espejo Deformable y Controlador por “WFS”, “DM” y “G”, respectivamente, se presenta en la Figura 5.4 el diagrama que representa el lazo de control de un sistema de óptica adaptativa.

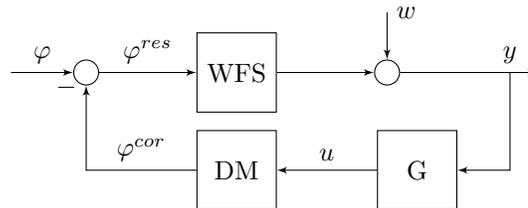


Figura 5.4: Diagrama de bloque de sistema de AO.

El objetivo de control es minimizar la varianza de la variable de error del lazo, que en este caso corresponde a la variable de fase residual φ^{res} . Conceptualmente, se busca que

el frente de onda del haz reflejado en el espejo deformable sea plano. Factores como el *seeing* atmosférico y la influencia de vibraciones en el frente de onda son los que deben ser atenuados para alcanzar el objetivo de control.

La fase del frente de onda incidente φ contiene la perturbación generada por la turbulencia atmosférica, la cual se denota por φ^{tur} . Adicionalmente, los efectos en la fase que generan las vibraciones a las que el sistema está sujeto también están contenidos en φ , y se denotan por $\varphi^{vib,i}$, donde $i \in \{1, \dots, n\}$ indica la n -ésima vibración a considerar.

$$\varphi = \varphi^{tur} + \varphi^{vib,1} + \varphi^{vib,2} + \dots + \varphi^{vib,n} \quad (5.1.2)$$

5.1.1. Estrategia Directa

En primera instancia, los subsistemas presentes en el modelo de la Figura 5.4 se pueden interpretar como sistemas de múltiples entradas y salidas.

La fase del frente de onda del haz incidente φ está definida dentro del área circular que comprende la apertura del telescopio. Luego, es posible definir φ como una función en el disco unitario y dependiente de las variables de radio r y ángulo θ .

$$\varphi = \varphi(r, \theta) \quad (5.1.3)$$

Se busca minimizar la diferencia entre la fase de corrección generada por el espejo deformable φ^{cor} y la fase incidente φ , esto es, minimizar la varianza de la fase residual φ^{res} . Sin embargo, no existe completa libertad en los posibles valores de φ^{cor} que se pueden obtener del espejo deformable, pues la forma que éste toma depende de un número finito de actuadores. De esta forma, la señal de control u se puede interpretar con un vector \bar{u} cuyo tamaño está definido por el número de actuadores en el espejo deformable.

La fase residual φ^{res} es la entrada al WFS. Su salida depende de su resolución, y se puede interpretar como un vector \bar{y} .

Luego, el sistema de control genera la actuación \bar{u} a partir de la medición ruidosa de \bar{y} . Ambos son vectores, cuyos tamaños dependen de la resolución del WFS para \bar{y} y del número de actuadores en el DM para \bar{u} .

El diagrama presentado en la Figura 5.4 se presenta nuevamente en la Figura 5.5, usando las variables de esta estrategia MIMO.

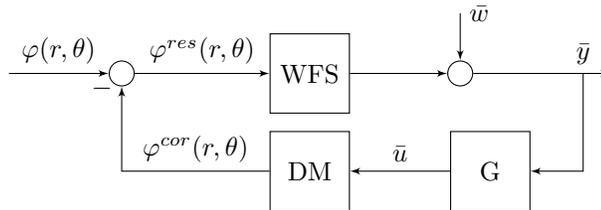


Figura 5.5: Diagrama de bloque de sistema de AO, estrategia MIMO.

Esta estrategia para el modelado del sistema de AO es poco conveniente, pues las funciones de transferencia contenidas en los bloques WFS y DM involucran conversión de variables

continuas en el espacio a variables discretas o viceversa, existiendo pérdida de información en el camino. Adicionalmente, el tamaño de los vectores \bar{u} e \bar{y} puede significar un diseño de alta complejidad para el controlador.

5.1.2. Estrategia de Amplitudes Modales

Es conveniente expandir φ en una base de funciones ortogonales $M_i(r, \theta)$ definidas en el disco unitario. De esta forma, la fase se puede descomponer en función de ellas, en cualquier instante.

$$\varphi_k(r, \theta) = \sum_{i=1}^{\infty} z_{i,k} M_i(r, \theta) \quad (5.1.4)$$

Ésta es la descomposición en modos ortogonales de la fase (Sección 2.3.4), donde M_i representa cada modo. Luego, la fase incidente en un instante determinado se puede representar por un vector z que comprende los factores z_1, z_2, \dots

Aprovechando la ortogonalidad de los modos, es posible diseñar para cada uno de ellos un lazo de control específico. De esta forma, los lazos de control son desacoplados, para cada modo.

En este modelo simplificado, las variables que describen el lazo de control ya no son vectores o funciones en el disco unitario, sino que todas ellas son variables unidimensionales. Así, se transforma el modelo MIMO a una serie de modelos SISO.

En el lazo de control asociado a un modo ortogonal determinado, las variables de fase φ , φ^{cor} y φ^{res} ahora describen la magnitud del modo presente en cada fase. El WFS entrega en su salida la magnitud detectada de ese modo en el frente de onda residual, y el DM recibe en su entrada la magnitud del modo que debe generar en la deformación del espejo.

Se asume que tanto el WFS como el DM responden de forma lineal a sus entradas. Por lo tanto, se modelan como un retardo temporal junto a un factor que caracterize la relación lineal [38]. Esta relación se presenta en las ecuaciones siguientes, donde d_m indica el retardo por medición (*measurement delay*) y d_c indica el retardo por corrección (*correction delay*).

$$y_k = D\varphi_{k-d_m}^{res} + w_k \quad (5.1.5)$$

$$\varphi_k^{cor} = N u_{k-d_c} \quad (5.1.6)$$

Luego, el diagrama de bloques que representa este modelo SISO es presentado en la Figura 5.6.

5.1.3. Ganancia del Controlador

El integrador clásico es el controlador más común en aplicaciones de AO [13]. Éste se puede definir por la siguiente función de transferencia.

$$G(z) = \frac{g}{1 - az^{-1}} \quad (5.1.7)$$

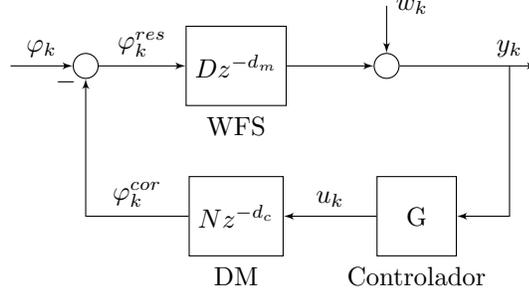


Figura 5.6: Diagrama de bloque de sistema de AO, estrategia SISO [12] [38]. Usando la descomposición en modos, se pueden desacoplar los lazos de control para cada uno de los modos, tratando cada lazo como un modelo SISO.

El valor de a es usualmente igual a 1, a menos que se busque diseñar un controlador que evite efectos de windup [13]. Por otra parte, la ganancia del controlador g es ajustada según el criterio de diseño.

El valor de g puede ser escogido a través de un criterio de minimización de varianza [39], de tal forma que la varianza resultante de la fase residual φ^{res} sea mínima.

La amplitud modal de la fase residual φ^{res} está determinada por las dos entradas del lazo de AO: la amplitud modal de la fase incidente φ y el ruido de medición w .

$$\varphi^{res}(j\omega) = E(j\omega)\varphi(j\omega) + H(j\omega)w(j\omega) \quad (5.1.8)$$

Las funciones de transferencia de rechazo $E(z)$ y de ruido $H(z)$ se obtienen de las ecuaciones (5.1.5), (5.1.6) y (5.1.7), bajo el esquema de control presentado en la Figura 5.6.

$$E(z) = \frac{1 - az^{-1}}{1 - az^{-1} + DNgz^{-(d_m+d_c)}} \quad H(z) = \frac{-Ngz^{-d_c}}{1 - az^{-1} + DNgz^{-(d_m+d_c)}} \quad (5.1.9)$$

De la ecuación (5.1.8), es posible expresar la PSD de la fase residual φ^{res} como una función de las PSDs de la fase incidente φ y el ruido w . La PSD de una señal es indicada mediante la notación $\langle |\cdot|^2 \rangle$.

$$\langle |\varphi^{res}(j\omega)|^2 \rangle = |E(j\omega)|^2 \langle |\varphi(j\omega)|^2 \rangle + |H(j\omega)|^2 \langle |w(j\omega)|^2 \rangle \quad (5.1.10)$$

Una propiedad de las PSDs (ligada al teorema de Parseval) es que la varianza de la fase residual σ_{res}^2 está dada por la integral de la PSD correspondiente.

$$\sigma_{res}^2 = \int \langle |\varphi^{res}(j\omega)|^2 \rangle d\omega \quad (5.1.11)$$

Luego, es posible diseñar la ganancia del controlador g para obtener las funciones de transferencia $E(j\omega)$ y $H(j\omega)$ que minimizen la varianza de la fase residual [40].

$$\sigma_{res}^2 = \int |E(j\omega)|^2 \langle |\varphi(j\omega)|^2 \rangle d\omega + \int |H(j\omega)|^2 \langle |w(j\omega)|^2 \rangle d\omega \quad (5.1.12)$$

Para obtener el valor óptimo para g , es necesario conocer las PSDs de la fase incidente y del ruido de medición, y un modelo para la dinámica del lazo de AO (es decir, los valores para D , N , d_m y d_c).

5.1.4. Modelado de Turbulencia y Vibraciones

Como se ha mencionado anteriormente, la variable de entrada al lazo de control φ contiene información de la turbulencia y de las vibraciones, como se presenta en la ecuación (5.1.2). Se asume que las vibraciones sólo afectan de forma significativa a los modos tip/tilt.

$$\varphi_k^{modo} = \varphi_k^{tur,modo} + \sum_{i=1}^n \varphi_k^{vib,i,modo} \quad ; \text{ para modo} \in \{tip/tilt\} \quad (5.1.13)$$

$$\varphi_k^{modo} = \varphi_k^{tur,modo} \quad ; \text{ para otros modos} \quad (5.1.14)$$

Una clase de modelos ampliamente usados para describir la correlación temporal de la fases turbulentas y vibratorias son los procesos autorregresivos (AR) [14]. Se ha estudiado que un modelo de orden 2 (AR2) para cada modo turbulento y vibratorio lleva a un buen desempeño del lazo [41].

De esta forma, se puede modelar la fase turbulenta φ^{tur} como el proceso aleatorio descrito en la ecuación (5.1.15), donde v^{tur} es ruido blanco gausseano.

$$\varphi_{k+1}^{tur} = a_1^{tur} \varphi_k^{tur} + a_2^{tur} \varphi_{k-1}^{tur} + v_k^{tur} \quad (5.1.15)$$

De la misma forma, la variable de fase vibratoria $\varphi^{vib,i}$, para cada una de las n vibraciones, se asocia a un modelo resonante autorregresivo de orden 2 [15], sujeto a ruido blanco gausseano $v^{vib,i}$.

$$\varphi_{k+1}^{vib,i} = a_1^{vib,i} \varphi_k^{vib,i} + a_2^{vib,i} \varphi_{k-1}^{vib,i} + v_k^{vib,i} \quad (5.1.16)$$

Para cada fase φ^{tur} y $\varphi^{vib,i}$, es posible definir una función de transferencia cuya entrada es el ruido blanco gausseano correspondiente (v^{tur} , $v^{vib,i}$). Este esquema se presenta en el diagrama de la Figura 5.7, y la forma estándar de la función de transferencia asociada se presenta en la ecuación (5.1.17).



Figura 5.7: Diagramas de bloques, generación de fases φ^{tur} y $\varphi^{vib,i}$.

$$H_{\varphi}(z) = \frac{z^{-1}}{1 - a_1 z^{-1} - a_2 z^{-2}} \quad (5.1.17)$$

Para escoger los coeficientes a_1 y a_2 para cada fase, se observa el equivalente en el dominio continuo de las funciones de transferencia $H_{\varphi}(z)$: la función de segundo orden en

el dominio de Laplace. Ésta función está definida por su frecuencia natural ω_0 , coeficiente de amortiguamiento ζ y ganancia estática K_H .

$$H_\varphi(s) = \frac{K_H \omega_0^2}{s^2 + 2\zeta \omega_0 s + \omega_0^2} \quad (5.1.18)$$

Realizando una equivalencia entre los polos de ambas funciones de transferencia [15], y usando la relación $z = e^{sT_s}$, se obtienen expresiones para los coeficientes a_1 y a_2 en función de la frecuencia natural ω_0 , el coeficiente de amortiguamiento ζ y el periodo de muestreo T_s .

$$a_1 = 2e^{-\zeta \omega_0 T_s} \cos(\omega_0 T_s \sqrt{1 - \zeta^2}) \quad (5.1.19)$$

$$a_2 = -e^{-2\zeta \omega_0 T_s} \quad (5.1.20)$$

En la función de transferencia de tiempo discreto $H_\varphi(z)$, no se considera un factor de ganancia pues es proporcional a la varianza del ruido asociado. De esta forma, cada variable de fase (de turbulencia o de vibración) está definida por sus valores de frecuencia natural ω_0 , coeficiente de amortiguamiento ζ y varianza del ruido asociado σ_v^2 .

5.2. Modelo Lineal para MagAO

En las siguientes secciones, se describe el proceso de obtención de un modelo lineal para el sistema MagAO y la fase incidente, a partir de los datos capturados durante la sesión de observación del 31 de octubre de 2014.

Para obtener el modelo lineal para el lazo de control, se emplean las PSDs obtenidas de los datos capturados. Es posible identificar la dinámica del lazo a través de la comparación de las PSDs previas y posteriores a la optimización de ganancia (Sección 4.3.3).

Por otro lado, se busca también un modelo lineal para la fase incidente. Para ello, se estima la PSD correspondiente a la fase a partir de la PSD de los datos capturados. Luego, se identifica la fase turbulenta y fases vibratorias en la PSD de la fase incidente, asociando a cada una de ellas un modelo autorregresivo.

La Figura 5.8 presenta un diagrama de los procesos desarrollados para la obtención de los modelos lineales, detallando las secciones que presentan cada desarrollo.

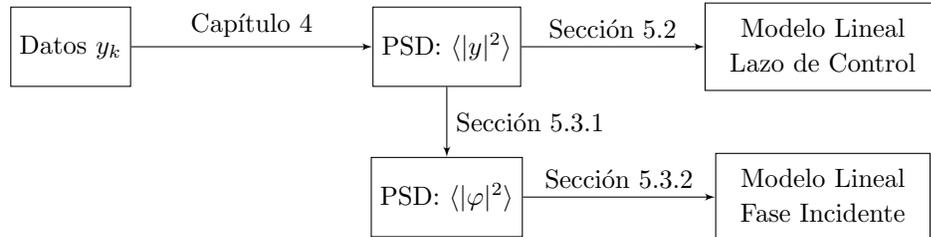


Figura 5.8: Proceso de obtención de modelos lineales para lazo de control y fase incidente.

Se emplea la estrategia de modelado por amplitudes modales. El modelo a presentar describe la dinámica del sistema para el modo Tip (primer modo). El análisis para el modo Tilt es equivalente al presentado.

Los datos WFS disponibles de la noche de observación de la sesión 2014b corresponden a datos de la salida y del esquema presentado en la Figura 5.6. Cabe mencionar que el lazo de control de MagAO opera a una frecuencia de 990 [Hz]. Como los datos WFS han sido capturados a un tercio de esta frecuencia, se asume que no existen componentes significativas a frecuencias mayores a 165 [Hz].

5.2.1. Datos de Optimización de Ganancia

En base al esquema de lazo de control presentado en la Figura 5.6, se diseña un modelo para el sistema de lazo cerrado de MagAO.

Se asume un controlador integrativo clásico para MagAO. Esta clase de controladores es la más usada en aplicaciones de óptica adaptativa [13], y durante la sesión de observación 2014b, el equipo MagAO nos ha informado que el sistema usa un controlador integrativo.

Entonces, el diagrama que describe el modelo a utilizar se presenta en la Figura 5.9.

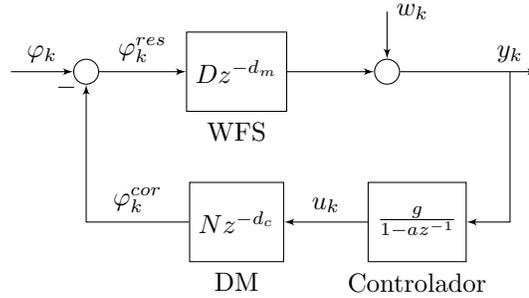


Figura 5.9: Diagrama de bloque de sistema de AO, base para diseño de modelo para MagAO.

Se propone encontrar un modelo para el controlador usando el efecto de la optimización de ganancia en las PSDs de los datos WFS.

Los datos WFS disponibles corresponden a las amplitudes modales de la salida del sistema y . Su valor está determinado por las dos entradas del lazo de AO: la amplitud modal de la fase incidente φ y el ruido de medición w .

$$y(j\omega) = H_{y\varphi}(j\omega)\varphi(j\omega) + H_{yw}(j\omega)w(j\omega) \quad (5.2.1)$$

Es posible expresar la PSD de la salida y como una función de las PSDs de la fase incidente φ y el ruido w .

$$\langle |y(j\omega)|^2 \rangle = |H_{y\varphi}(j\omega)|^2 \langle |\varphi(j\omega)|^2 \rangle + |H_{yw}(j\omega)|^2 \langle |w(j\omega)|^2 \rangle \quad (5.2.2)$$

Las funciones de transferencia presentadas en (5.2.1) y (5.2.2) se pueden describir a partir de las definiciones presentadas en la Figura 5.9.

$$H_{y\varphi}(z) = \frac{Dz^{-d_m}(1 - az^{-1})}{1 - az^{-1} + DNgz^{-(d_m+d_c)}} \quad (5.2.3)$$

$$H_{yw}(z) = \frac{1 - az^{-1}}{1 - az^{-1} + DNgz^{-(d_m+d_c)}} \quad (5.2.4)$$

Estas funciones de transferencia cumplen con la siguiente igualdad.

$$|H_{y\varphi}(j\omega)|^2 = D^2 |H_{yw}(j\omega)|^2 \quad (5.2.5)$$

Luego, se reescribe la ecuación (5.2.2).

$$\langle |y(j\omega)|^2 \rangle = |H_{yw}(j\omega)|^2 (D^2 \langle |\varphi(j\omega)|^2 \rangle + \langle |w(j\omega)|^2 \rangle) \quad (5.2.6)$$

Los Tests 4 y 5 poseen la misma configuración de la instrumentación, por lo que se considera que están bajo el mismo efecto de vibraciones. Por otro lado, como estos datos han sido capturados en un periodo de tiempo muy cercano (un rango de minutos), es posible asumir que las componentes frecuenciales en la fase turbulenta, así como el ruido de medición, no cambian de forma considerable del test 4 al test 5. Por lo tanto, se considera que el único cambio en el sistema entre los Tests 4 y 5 es la optimización de ganancia.

Se denotan como y_1 e y_2 las salidas capturadas para el test 4 y test 5, respectivamente. Por otro lado, las funciones de transferencia de lazo cerrado dependen de la ganancia del controlador; se denotan como $H_{yw,1}$ y $H_{yw,2}$ para los datos del Test 4 y 5, respectivamente.

$$\langle |y_1(j\omega)|^2 \rangle = |H_{yw,1}(j\omega)|^2 (D^2 \langle |\varphi(j\omega)|^2 \rangle + \langle |w(j\omega)|^2 \rangle) \quad (5.2.7)$$

$$\langle |y_2(j\omega)|^2 \rangle = |H_{yw,2}(j\omega)|^2 (D^2 \langle |\varphi(j\omega)|^2 \rangle + \langle |w(j\omega)|^2 \rangle) \quad (5.2.8)$$

Como se considera que la fase incidente y el ruido de medición no sufren cambios significativos entre ambos tests, se tiene el siguiente resultado.

$$\sqrt{\frac{\langle |y_2(j\omega)|^2 \rangle}{\langle |y_1(j\omega)|^2 \rangle}} = \frac{|H_{yw,2}(j\omega)|}{|H_{yw,1}(j\omega)|} = |H_{opt}(j\omega)| \quad (5.2.9)$$

$$H_{opt}(z) = \frac{1 - az^{-1} + DNg_1z^{-(d_m+d_c)}}{1 - az^{-1} + DNg_2z^{-(d_m+d_c)}} \quad (5.2.10)$$

Entonces, el objetivo de modelado es encontrar los valores $K_1 = DNg_1$ y $K_2 = DNg_2$ que generen la función de transferencia H_{opt} que mejor se ajuste a la relación presentada en (5.2.9).

La ecuación (5.2.9) no sólo es válida para los datos de los tests 4 y 5, sino que también se cumple para los tests 3 y 6, los tests 2 y 7 y los tests 1 y 8, pues para todos ellos se tiene igual configuración de instrumentos pero distinta ganancia del controlador.

Se escoge estimar la PSD de la salida del sistema pre-optimización $\langle |y_1(j\omega)|^2 \rangle$ como el promedio de las PSDs de los tests 2, 3 y 4, y la PSD de la salida post-optimización $\langle |y_2(j\omega)|^2 \rangle$ como el promedio de las PSDs de los tests 5, 6 y 7. La influencia de las condiciones climáticas y el funcionamiento de los Louvers generan componentes vibratorias significativamente mayores en el test 8 que en el test 1, por lo que no se emplean esos datos en este desarrollo.

5.2.2. Elección de Retardo del Lazo

A. Modelo para $d_m + d_c = 2$

Para encontrar los valores de g_1 y g_2 , es necesario definir el resto de los factores que describen la función de transferencia H_{opt} .

Se define $a = 1$ para trabajar con un controlador integrativo clásico. Por otra parte, se definen los retardos de medición y corrección iguales a 1 ($d_m = d_c = 1$).

La función de transferencia H_{opt} resultante es

$$H_{opt}(z) = \frac{1 - z^{-1} + K_1 z^{-2}}{1 - z^{-1} + K_2 z^{-2}} \quad (5.2.11)$$

K_1 y K_2 pueden llevar valores entre 0 y 1, para asegurar que tanto $H_{opt}(z)$ como su inversa $H_{opt}^{-1}(z)$ sean estables.

La Figura 5.10 presenta posibles magnitudes para H_{opt} . Se restringen las funciones de transferencia graficadas de forma que, a baja frecuencia, sean similares en magnitud a la raíz del cociente entre PSDs de la salida.

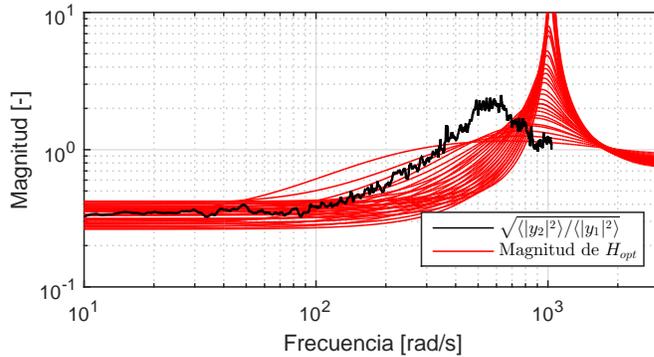


Figura 5.10: Gráfico comparativo para proceso de modelado a partir de optimización de ganancia, para $d_m + d_c = 2$.

Se puede observar que no se han obtenido funciones para H_{opt} que se asemejen a la raíz del cociente entre las PSDs de datos previos y posteriores a la optimización de ganancia.

B. Modelo para $d_m + d_c = 3$

Modificando el criterio de diseño asociado a los tiempos de retardo, se define $d_m + d_c = 3$. La función de transferencia H_{opt} resultante es

$$H_{opt}(z) = \frac{1 - z^{-1} + K_1 z^{-3}}{1 - z^{-1} + K_2 z^{-3}} \quad (5.2.12)$$

Para este caso, los factores K_1 y K_2 pueden tomar valores entre 0 y 0.618, para asegurar estabilidad de $H_{opt}(z)$ y su inversa.

La Figura 5.11 presenta posibles magnitudes para H_{opt} . Se restringen las funciones de transferencia graficadas de forma que, a baja frecuencia, sean similares en magnitud a la

raíz del cociente entre PSDs de la salida.

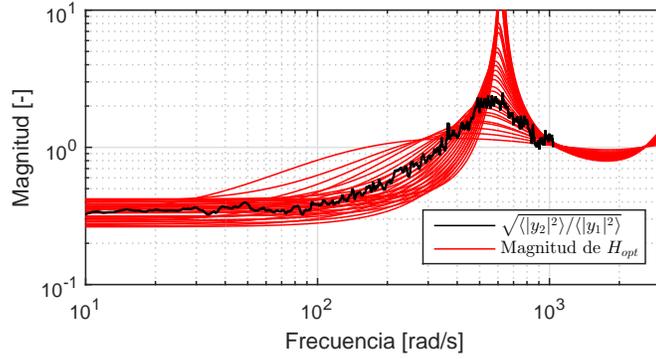


Figura 5.11: Gráfico comparativo para proceso de modelado a partir de optimización de ganancia, para $d_m + d_c = 3$.

En este caso, sí se observan funciones H_{opt} con una respuesta a frecuencia semejante a la determinada por la raíz del cociente de PSDs. La función de transferencia escogida es aquella cuyo logaritmo de su magnitud $\log(|H_{opt}|)$ tenga el menor error cuadrático medio con respecto al logaritmo de la raíz del cociente de PSDs.

La función H_{opt} escogida es presentada en la Figura 5.12. Se obtiene el menor error cuadrático medio para $K_1 \approx 0.1294$ y $K_2 \approx 0.3736$.

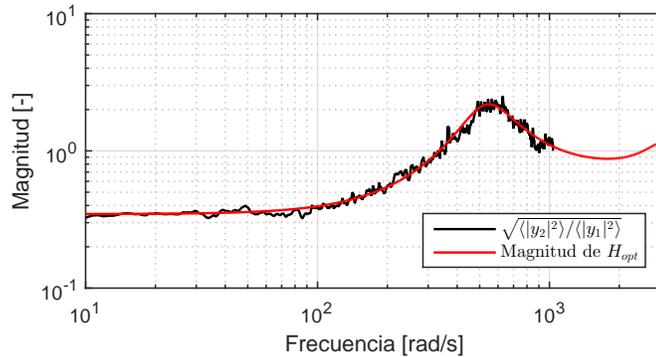


Figura 5.12: Solución para H_{opt} que minimiza el error cuadrático, para $d_m + d_c = 3$.

Se obtiene un modelo lineal para las PSDs de los datos WFS del Test 5, pues este set de mediciones sólo contiene vibraciones inherentes, y posee la ganancia optimizada.

- Se define $a = 1$ para el controlador integrativo.
- Para la ganancia optimizada del controlador, se ha obtenido un valor de $K_2 = DN g_2 = 0.3736$. No se dispone de información respecto a la dinámica de los instrumentos del lazo de control (espejo deformable y sensor de frente de onda), desconociendo también

los límites en el valor de ganancia que puede tomar el controlador. Como criterio de diseño, se escoge emplear $D = N = 1$ y $g = 0.3736$.

Para el factor D del WFS, es posible considerar que aumentar la varianza de una señal es equivalente a una amplificación de su PSD (equivalencia de potencia media). Luego, debido a las ecuaciones (5.2.2) y (5.2.3) el valor de D^2 y la varianza de la fase incidente φ son inversamente proporcionales, ante una misma salida. Por lo tanto, el modelo a obtener para la PSD de la fase incidente depende de la elección del factor D .

Por otro lado, el factor N del DM caracteriza la transferencia de la actuación u a la fase de corrección φ^{cor} . Para un diseño de control en base a la minimización de la varianza de la fase residual, se busca que la actuación u genere en la fase de corrección una estimación de la fase incidente. Por lo tanto, el diseño para una ley de control óptima de u dependerá del factor N escogido.

El desarrollo presentado en adelante es equivalente para distintos valores de los factores D y N , siempre que se cumpla $DN > 0$ y $DN < 1.6542$ para mantener la estabilidad del lazo y el valor de $K \approx 0.3736$.

- Existen tres retardos de tiempo entre la actuación y la salida ($d_m + d_c = 3$). Se escoge adjudicar el retardo adicional al espejo deformable, pues su procesamiento es más complejo que el caso del sensor de frente de onda. Luego, $d_m = 1$ y $d_c = 2$.

El modelo resultante se presenta en la Figura 5.13.

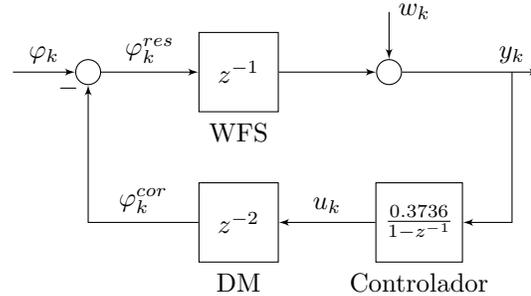


Figura 5.13: Diagrama de bloques de modelo lineal para sistema MagAO.

5.3. Modelo Lineal para Fase Incidente

5.3.1. Estimación de PSD de Fase Incidente

Para obtener un modelo lineal para la fase incidente, es necesario primero obtener una estimación de su PSD a partir de los datos capturados. En el siguiente proceso, se utilizan los datos WFS del eje X del Test 5, y el modelo para MagAO previamente diseñado y presentado en la Figura 5.13.

De la ecuación (5.2.2), es posible observar que la PSD de la salida y posee una componente que proviene de la fase incidente y una componente que otorga el ruido de medición.

$$\langle |y(j\omega)|^2 \rangle = \langle |y_\varphi(j\omega)|^2 \rangle + \langle |y_w(j\omega)|^2 \rangle \quad (5.3.1)$$

$$\langle |y_\varphi(j\omega)|^2 \rangle = |H_{y\varphi}(j\omega)|^2 \langle |\varphi(j\omega)|^2 \rangle \quad (5.3.2)$$

$$\langle |y_w(j\omega)|^2 \rangle = |H_{yw}(j\omega)|^2 \langle |w(j\omega)|^2 \rangle \quad (5.3.3)$$

A. PSD de Ruido de Medición

La componente del ruido de medición en la PSD de la salida, presentada en la ecuación (5.3.3), depende de la varianza del ruido y de la función de transferencia $H_{yw}(j\omega)$. Por la definición de ésta en la ecuación (5.2.4), se observa que no depende de los factores D y N , sino del factor $K = DN$ que ha sido identificado en la Sección 5.2.

La magnitud de la PSD de la componente del ruido $\langle |y_w(j\omega)|^2 \rangle$ no puede superar la magnitud de la PSD de la salida $\langle |y(j\omega)|^2 \rangle$. Por lo tanto, existe un límite superior para la varianza del ruido de medición. La Figura 5.14 presenta la PSD de la salida (eje X, test 5) y una estimación para su componente del ruido de medición, definiendo la varianza del ruido cercana a su límite superior.

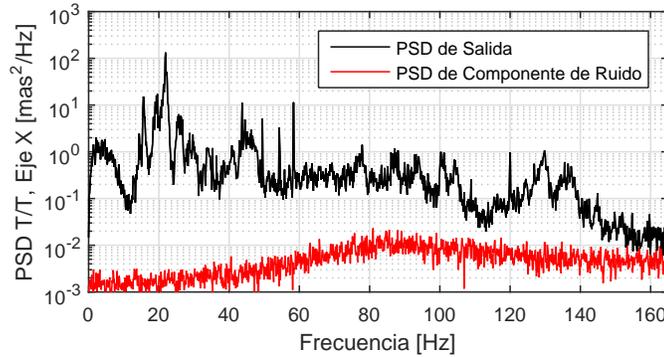


Figura 5.14: PSDs de datos de salida y de componente del ruido de medición en datos de salida.

B. PSD de Fase Incidente

Como se observa en el resultado de la Figura 5.14, la PSD de la salida está en mayor parte definida por su componente de la fase incidente. Por lo tanto, se asume que la componente del ruido de medición es comparativamente pequeña. Luego, a partir de la ecuación (5.3.1), se obtiene una estimación para la PSD de la fase incidente.

$$\begin{aligned} \langle |y(j\omega)|^2 \rangle &\approx \langle |y_\varphi(j\omega)|^2 \rangle \\ \Rightarrow \langle |w(j\omega)|^2 \rangle &\approx \frac{\langle |y(j\omega)|^2 \rangle}{|H_{yw}(j\omega)|^2} \end{aligned} \quad (5.3.4)$$

Este resultado es presentado en la Figura 5.15.

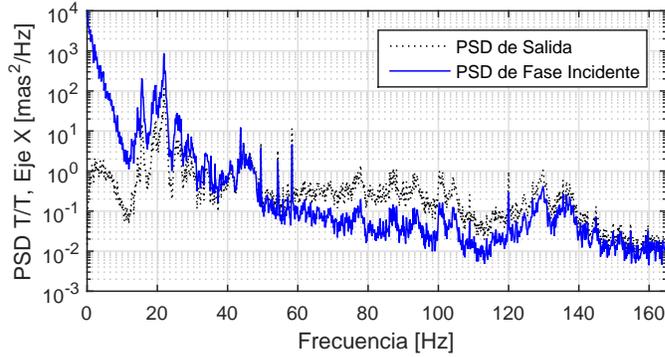


Figura 5.15: PSDs de datos de salida y de fase incidente.

5.3.2. Modelos AR2 para Fase Incidente

Como se ha presentado en la sección 5.1.4, una alternativa de modelado ampliamente usada para la correlación de las fases turbulentas y vibratorias son los modelos autorregresivos.

Es posible identificar peaks de vibración en la PSD de la fase incidente obtenida desde la PSD de la salida (Figura 5.16). Cada uno de estos peaks puede ser modelado a través de un proceso autorregresivo resonante de orden 2. Así, se modelan las fases vibratorias $\varphi^{vib,i}$.

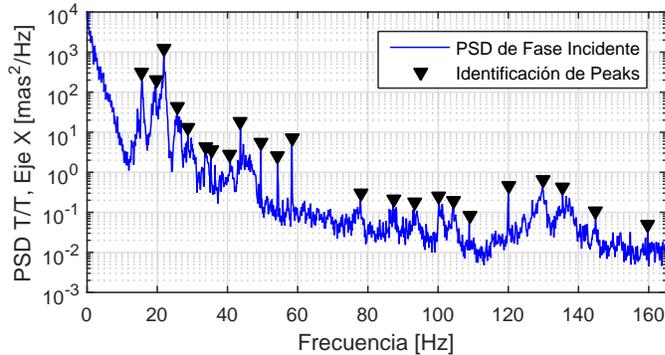


Figura 5.16: Identificación de peaks vibratorios en la PSD de la fase incidente.

A través de un método iterativo, modelos autorregresivos de segundo orden (AR2) son encontrados para cada uno de los peaks de vibración detectados, definiendo valores para ω_o , ζ y σ_v^2 para cada peak. La Figura 5.17 presenta dos de los modelos AR2 que describen fases vibratorias.

Por otro lado, se busca también un modelo para la fase turbulenta. En base a la hipótesis de Taylor [21], las componentes de baja frecuencia en la PSD de la salida son atribuidas a

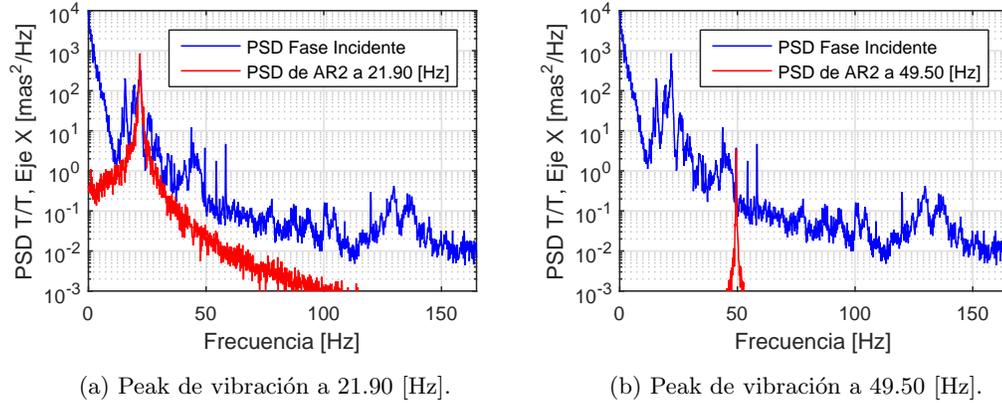


Figura 5.17: PSDs de fase incidente y de modelos AR2 resonantes para fases vibratorias.

la fase turbulenta φ^{tur} . Por lo tanto, ésta es descrita por un modelo AR2 no resonante y de baja frecuencia natural. La Figura 5.18 presenta la PSD de la fase turbulenta modelada.

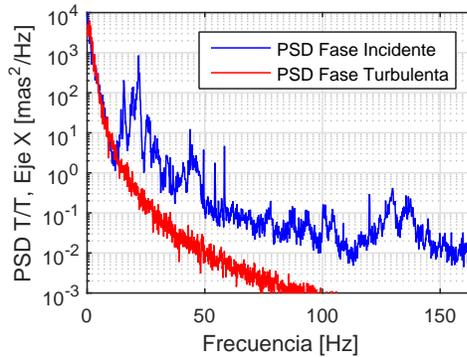


Figura 5.18: PSDs de fase incidente y de modelo AR2 para fase turbulenta.

El modelo completo para la PSD de la fase incidente es la suma de las contribuciones de la fase turbulenta y las fases vibratorias. Se presenta este resultado en la Figura 5.19.

El modelo lineal para la fase incidente ha sido diseñado en base a las componentes frecuenciales más significativas: fase de turbulencia y fases de vibración. Es por eso que se puede observar en la Figura 5.19 que el modelo se ajusta a la PSD de los datos reales en los peaks de frecuencia, pero no es así para zonas libres de peaks, como las zonas cercanas a 70 [Hz] o a frecuencias mayores que 110 [Hz].

El objetivo del modelo es poder diseñar un sistema de control que contrarreste la presencia de peaks de frecuencia en la fase incidente. Como el centro de atención en el diseño de control son los peaks vibratorios, se considera que el modelo obtenido es aceptable para el diseño de una ley de control.

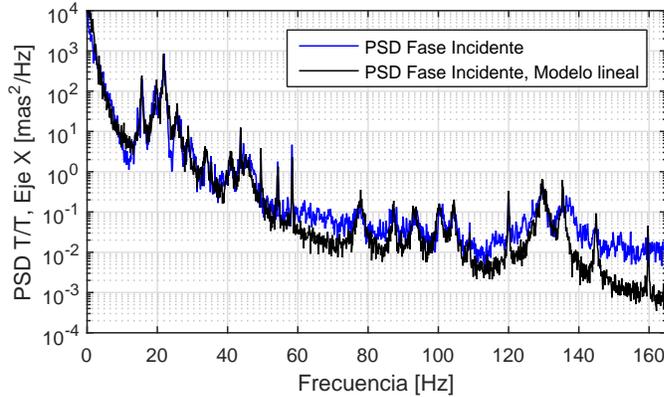


Figura 5.19: PSDs de la fase incidente y de modelo para la fase incidente basado en la suma de modelos AR2.

5.4. Resumen del Capítulo

En el presente capítulo, se han obtenido modelos lineales para el sistema de control de MagAO, como también para la fase incidente observada durante la noche de la sesión de observación 2014b. Los modelos son simplificaciones de la dinámica real del sistema, y su objetivo es el de poder diseñar un sistema de control para contrarrestar los efectos de la turbulencia y vibraciones en la fase incidente. Se espera que el sistema de control diseñado a partir de estos modelos otorgue mejores resultados que el sistema de control integrativo, pues es capaz de predecir el comportamiento de la fase incidente.

La estrategia de amplitudes modales usada en el proceso de modelado es sumamente útil para poder simplificar el problema. Esta estrategia permite desacoplar los lazos de control, para trabajar con modelos SISO. De esta forma, los sistemas dinámicos complejos involucrados en el espejo deformable y el sensor de frente de onda pueden simplificarse a modelos lineales de retardos de tiempo y un factor de proporción.

Por otro lado, la estrategia de generar un modelo para la fase incidente permite predecir el comportamiento de ésta, para un posterior diseño de control. De esta forma, se espera que un sistema de control considerando el modelo de la fase tenga un mejor desempeño que la alternativa de control integrativo.

Para la obtención del modelo lineal de MagAO, se han usado los datos capturados bajo distintos valores de ganancia del controlador, y ha sido posible obtener una estimación para el valor de $K = DNg$. Sin embargo, los valores de D , N y g por separado son desconocidos. Por lo tanto, el modelo de la fase incidente, como también del posterior diseño de control, están sujetos a la elección de D y N .

Los primeros pasos realizados en el proceso de modelado del sistema MagAO, así como de su fase incidente, han sido publicados en [18], a presentar en la conferencia SPIE Astronomical Instrumentation + Telescopes 2016 en Edimburgo, Escocia.

A continuación, se presenta un diseño de control óptimo de minimización de la varianza de la fase residual, basado en los modelos de MagAO y de la fase incidente.

CONTROL DE LAZO DE ÓPTICA ADAPTATIVA

Este capítulo presenta el proceso de diseño de control óptimo para el sistema MagAO, basado en los datos capturados durante la sesión de observación 2014b y el modelo obtenido en el Capítulo 5.

En primer lugar, se presenta el desarrollo publicado por diversos centros de investigación astronómica respecto al diseño de controladores para AO. Luego, se diseña un sistema de control óptimo LQG para MagAO, basado en el Filtro de Kalman y una ley de control para minimización de varianza de la fase incidente. Finalmente, se presenta el proceso de simulación de la alternativa de control, obteniendo resultados numéricos y comparando el desempeño en mitigación de vibraciones y en potencia media de la señal con respecto al control integrativo.

Los lazos de control en sistemas de óptica adaptativa suelen emplear controladores integrativos clásicos, pues éstos son sencillos de implementar, y bajo un criterio de optimización de ganancia [39], brindan un desempeño adecuado para el sistema.

Sin embargo, debido a los requerimientos de desempeño en la operación de los sistemas de AO, cada vez se hacen más necesarios sistemas de control especializados. Uno de los motivos es la presencia de vibraciones, las que solían ser despreciadas, pero con las metas más exigentes de precisión y resolución de los sistemas de AO, su mitigación es clave para poder dar el próximo paso a resultados de mayor calidad.

La alternativa de usar un controlador integrativo para el lazo de AO ha sido estudiada y optimizada [39]. No obstante, para los primeros modos de la descomposición del frente de onda (modos tip/tilt), el control integrativo ya no es suficiente, pues no es capaz de contrarrestar el efecto vibratorio. Estos modos son los que se ven más afectados por los efectos turbulentos y vibratorios, y para que éstos sean correctamente tratados, se requiere de un controlador dedicado a este objetivo.

Estudios previos presentan desarrollo en el estudio de implementaciones de controladores de diversas naturalezas. Entre éstas, se puede mencionar el uso de sistemas de control LQG [13] [14] [40], controladores en \mathcal{H}_2 [12] y controladores en \mathcal{H}_∞ [13]. En cada uno de estos casos, se compara el desempeño del sistema de control con respecto al controlador integrativo, obteniendo mejores desempeños del lazo.

Otras propuestas de diseño de control, como estrategias predictivas [42] o diseño óptimo

en presencia de saturación [43], han sido estudiadas y publicadas.

6.1. Control LQG para MagAO

A partir del modelo diseñado en el Capítulo 5, se prosigue con el diseño de control para el sistema MagAO. El objetivo de este diseño es el de contrarrestar el efecto de las vibraciones en la fase incidente, a través de un correcto manejo del espejo deformable.

Específicamente, se implementa un sistema de control LQR, con un estimador de estado en base al Filtro de Kalman, y una ley de control que minimice la varianza de la fase residual φ^{res} .

6.1.1. Modelo en Variables de Estado para MagAO

Para el diseño del sistema de control LQG, se necesita un modelo en variables de estado para el sistema MagAO y la fase incidente.

- En primer lugar, se puede expresar la variable de salida y como función del ruido de medición w (cuya varianza se denota por σ_w^2), la fase incidente φ_k y la actuación u . Se usa la definición de los retardos de medición y corrección $d_m = 1$ y $d_c = 2$.

$$y_k = w_k + D\varphi_{k-1} - DNu_{k-3} \quad (6.1.1)$$

- La fase incidente φ se compone de la suma de la fase turbulenta φ^{tur} y una serie de fases vibratorias $\varphi^{vib,i}$, cada una descrita por un modelo autorregresivo de orden 2. Los valores para los coeficientes a_1 y a_2 , como también para la varianza del error σ_v^2 , se calculan en base a las vibraciones presentes en los datos WFS capturados.

$$\varphi_k = \varphi_k^{tur} + \varphi_k^{vib,1} + \dots + \varphi_k^{vib,n} \quad (6.1.2)$$

$$\varphi_{k+1}^{tur} = a_1^{tur} \varphi_k^{tur} + a_2^{tur} \varphi_{k-1}^{tur} + v_k^{tur} \quad (6.1.3)$$

$$\varphi_{k+1}^{vib,i} = a_1^{vib,i} \varphi_k^{vib,i} + a_2^{vib,i} \varphi_{k-1}^{vib,i} + v_k^{vib,i} \quad (6.1.4)$$

Es posible reescribir la ecuación autorregresiva de cada fase (turbulenta o vibratoria) en forma matricial.

$$\begin{aligned} \varphi_{k+1} &= a_1 \varphi_k + a_2 \varphi_{k-1} + v_k \\ \Rightarrow \begin{bmatrix} \varphi_{k+1} \\ \varphi_k \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} a_1 & a_2 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_k \\ \varphi_{k-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_k \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6.1.5)$$

A partir de estas definiciones, se busca representar el modelo para el sistema MagAO en un modelo de variables de estado.

A. Vector de Estado

Se emplean los componentes de la fase incidente para definir el vector de estado [14]. Como el sistema tiene un retardo total (entre actuación y salida) de $d_m + d_c = 3$, se usan los valores de cada fase (turbulenta o vibratoria) en tres instantes para definir el vector de estado.

$$x_k = \begin{bmatrix} x_k^{tur} \\ x_k^{vib,1} \\ \vdots \\ x_k^{vib,n} \end{bmatrix}; \quad x_k^\bullet = \begin{bmatrix} \varphi_{k+1}^\bullet \\ \varphi_k^\bullet \\ \varphi_{k-1}^\bullet \end{bmatrix} \quad (6.1.6)$$

Se define la ecuación iterativa del vector de estado.

$$x_{k+1} = Ax_k + v_k \quad (6.1.7)$$

$$A = \begin{bmatrix} A^{tur} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & A^{vib,1} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & A^{vib,n} \end{bmatrix}; \quad A^\bullet = \begin{bmatrix} a_1^\bullet & a_2^\bullet & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (6.1.8)$$

$$v_k = \begin{bmatrix} V_k^{tur} \\ V_k^{vib,1} \\ \dots \\ V_k^{vib,n} \end{bmatrix}; \quad V_k^\bullet = \begin{bmatrix} v_{k+1}^\bullet \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6.1.9)$$

B. Salida en Función del Vector de Estado

A partir de la ecuación (6.1.1), se define la salida y en función del vector de estado, la actuación y el ruido de medición.

$$y_k = Cx_k - DNu_{k-3} + w_k \quad (6.1.10)$$

$$C = [C^{tur} \quad C^{vib,1} \quad \dots \quad C^{vib,n}]; \quad C^\bullet = [0 \quad 0 \quad D] \quad (6.1.11)$$

De esta forma, las ecuaciones (6.1.7) y (6.1.10) describen el modelo en variables de estado para el sistema MagAO en presencia de vibraciones.

6.1.2. Estimación de Estado: Filtro de Kalman

Se ha demostrado [40] que el controlador óptimo para el sistema de óptica adaptativa presentado, en términos de reducción de la varianza de la señal de error, es un controlador LQG. Éste se basado en la estimación óptima del estado a través del Filtro de Kalman [13].

Se define la ecuación recursiva de predicción de estado.

$$\begin{aligned} \hat{x}_{k+1|k} &= A\hat{x}_{k|k-1} + L(y_k - \hat{y}_{k|k-1}) \\ &= A\hat{x}_{k|k-1} + L(y_k - C\hat{x}_{k|k-1} + DNu_{k-3}) \end{aligned} \quad (6.1.12)$$

donde L es la ganancia estacionaria de Kalman. Definiendo la varianza del ruido de medición σ_w^2 , el valor de L es obtenido de

$$L = APC^T(CPC^T + \sigma_w^2)^{-1} \quad (6.1.13)$$

P corresponde a la solución para la siguiente ecuación algebraica de Ricatti de tiempo discreto.

$$P = APA^T + APC^T(CPC^T + \sigma_w^2)^{-1}CPA^T + R_v \quad (6.1.14)$$

R_v es la matriz de covarianza del ruido de la fase, y se define como

$$R_v = \begin{bmatrix} R_{v,tur}^2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & R_{v,vib,1}^2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & R_{v,vib,n}^2 \end{bmatrix}; \quad R_{v,\bullet} = \begin{bmatrix} \sigma_{v,\bullet}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6.1.15)$$

6.1.3. Ley de Control: Minimización de Varianza

El objetivo del diseño de control es minimizar la varianza de la fase residual φ^{res} . La fase residual depende de la fase incidente y la actuación del controlador. Entonces, la función de costo esta definida por:

$$\begin{aligned} J &= E \left\{ \sum \left((\varphi_k^{res})^2 \right) \right\} \\ &= E \left\{ \sum \left((\varphi_k - \varphi_k^{cor})^2 \right) \right\} \\ &= E \left\{ \sum \left((\Phi x_{k-1} - Nu_{k-2})^2 \right) \right\} \end{aligned} \quad (6.1.16)$$

$$\Phi = [\Phi^{tur} \quad \Phi^{vib,1} \quad \dots \quad \Phi^{vib,n}]; \quad \Phi^\bullet = [1 \quad 0 \quad 0] \quad (6.1.17)$$

Para cada iteración k , una estimación para el vector de estado siguiente $\hat{x}_{k+1|k}$ está disponible. Por lo tanto, u_k es escogido de forma que minimice la función de costo presentada en (6.1.16).

$$\begin{aligned} \Phi x_{k+1} - Nu_k &\approx 0 \\ \Rightarrow u_k &= N^{-1} \Phi \hat{x}_{k+1|k} \end{aligned} \quad (6.1.18)$$

6.1.4. Obtención de Fase Incidente en el Tiempo

Para simular el sistema MagAO bajo un diseño de control LQR, se requiere de una estimación para la fase incidente φ_k en el tiempo, a una frecuencia de muestreo de 990 [Hz]. Esto pues el lazo de control de óptica adaptativa de MagAO funciona a esa frecuencia. Entonces, se realiza un proceso de interpolado a partir de los datos de salida y_k capturados a 330 [Hz], y se obtiene una estimación para φ_k usando el modelo para el lazo cerrado, obtenido en la Sección 5.2.

Existen múltiples alternativas para interpolar un set de datos, vía estrategias continuas o discontinuas. Se observan los resultados obtenidos al aplicar a los datos capturados interpolación lineal (continua de clase C^0), interpolación con polinomios de Hermite (continua de clase C^1) e interpolación segmentaria cúbica (continua de clase C^2). Éstos corresponden a los métodos “linear”, “pchip” y “spline” disponibles para la función *interp1* implementada en *MATLAB*.

Se observan las PSDs obtenidas para las tres alternativas de interpolación. Este resultado se presenta en la Figura 6.1.

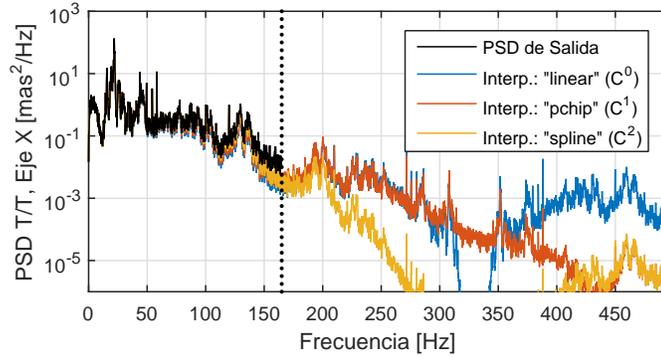


Figura 6.1: PSDs de datos de salida y de interpolaciones de los datos, al triple de su frecuencia de muestreo.

Se escoge emplear la alternativa de interpolación “spline”, pues otorga una menor parte de la potencia media de la señal a la banda de frecuencias mayores a 165 [Hz].

Para obtener una estimación de la fase incidente en el tiempo, se emplea el modelo lineal obtenido en la Sección 5.2. Se considerará que la contribución del ruido de medición en la señal de salida es suficientemente pequeña (en las frecuencias de interés) con respecto a la componente de la fase incidente en la salida. Luego, la fase se estima invirtiendo la función de transferencia $H_{y\varphi}(z)$.

$$\begin{aligned}
 H_{y\varphi}(z) &= \frac{\mathcal{Z}\{y_k\}}{\mathcal{Z}\{\varphi_k\}} = \frac{Dz^{-1}(1-z^{-1})}{1-z^{-1}+Kz^{-3}} \\
 \Rightarrow \varphi_k &= \mathcal{Z}^{-1}\left\{\left[\frac{1-z^{-1}+Kz^{-3}}{D(1-z^{-1})}\right]\mathcal{Z}\{y_{k+1}\}\right\}
 \end{aligned} \tag{6.1.19}$$

Cabe notar que la estimación de la fase depende del parámetro D , que es desconocido y se asumirá $D = 1$. El valor de D está ligado al de N y g según el proceso de identificación realizado en la Sección 5.2 ($DNg = 0.3736$).

En caso de obtener un valor para D a partir del estudio de la dinámica del WFS, la estimación de la fase resultante tendría una distinta potencia media (distinta varianza), pero la magnitud relativa de sus componentes frecuenciales no se verían afectados.

De esta forma, se obtiene una estimación para la fase incidente en el tiempo, a una frecuencia de muestreo de 990 [Hz]. Se obtienen estimaciones para la fase desde los datos

WFS de eje X (modo tip) del Test 5 (sólo sujeto a vibraciones inherentes), y del Test 8 (sujeto también a vibraciones adicionales, inducidas por instrumentos).

6.2. Simulación y Resultados

A continuación, se presenta el proceso de simulación de las alternativas de control integrativo y control LQG para el sistema MagAO.

Se implementa el lazo cerrado con controlador integrativo y control LQG, para la estimación de fase incidente desde datos del Test 5 (vibraciones inherentes). Se espera ver en el caso de control integrativo resultados para la PSD de la salida equivalentes a los datos capturados. Por otro lado, en el caso de control LQG, se espera que las vibraciones presenten en los datos capturados del Test 5 sean mitigadas, y que la potencia media de la señal sea reducida.

Adicionalmente, se implementan ambas alternativas de control para datos provenientes del Test 8. Se utilizan los datos del Test 8 pues éstos poseen vibraciones adicionales inducidas por los tres instrumentos analizados en la Sección 4.3.4, y se desea observar el desempeño del sistema de control ante vibraciones no consideradas en el modelo de fase incidente desde el cual se ha diseñado el controlador.

El proceso realizado se detalla en el diagrama de la Figura 6.2.

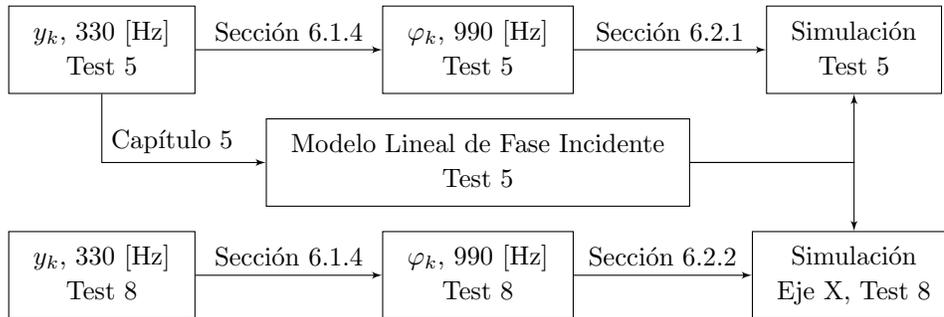


Figura 6.2: Proceso de implementación de estrategias de control en simulación.

6.2.1. Sistema ante Vibraciones Inherentes

Se implementa el modelo lineal para MagAO, empleando como entradas la estimación de la fase incidente y ruido de medición, escogiendo su varianza σ_w^2 cercana al límite superior definido en la Sección 5.3.1.

A. Simulación de Control Integrativo, Test 5

Como la estimación de la fase incidente se ha realizado en base al modelo lineal para MagAO, y este mismo modelo se utiliza para la simulación de control integrativo, se espera que la PSD de la salida por simulación sea equivalente a la PSD de la salida real. Se presenta este resultado en la Figura 6.3.

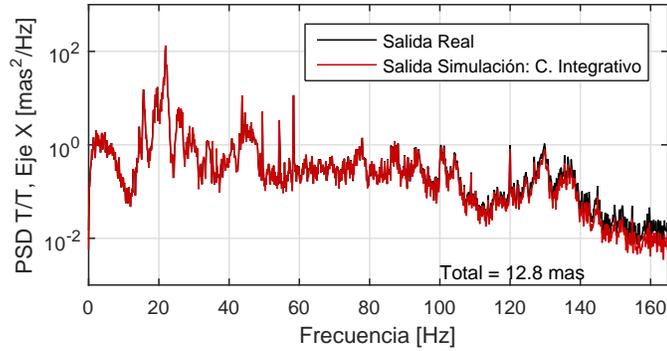


Figura 6.3: PSDs de salida real y salida por simulación, bajo control integrativo. Datos de Test 5. Valor RMS total es indicado.

La diferencia entre ambas PSDs a alta frecuencia es atribuida a la estimación de la fase incidente a partir de una interpolación de los datos de salida.

B. Simulación de Control LQG, Test 5

Se implementa vía simulación la estrategia de control LQG presentada en la Sección 6.1. Para ello, se emplean la estimación de fase incidente y ruido de medición previamente definido.

La Figura 6.4 presenta la PSD de la salida obtenida de la simulación de control LQG.

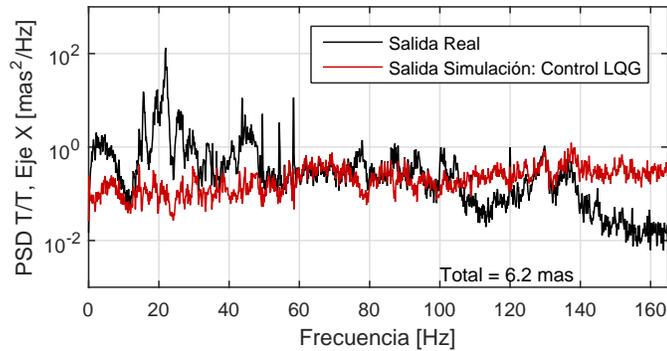


Figura 6.4: PSDs de salida real y salida por simulación, bajo control LQG. Datos de Test 5. Valor RMS total es indicado.

El valor RMS total de la salida, bajo control LQG, es de 6.2 [mas], considerablemente menor que el valor de 12.8 [mas] para el valor RMS de la alternativa de control integrativo. El resultado aquí presentado sugiere una gran ventaja para el desempeño del sistema ante el uso de control LQG.

Adicionalmente, se comparan los valores RMS asociados a las vibraciones inherentes. El

sistema de control LQG ha sido diseñado para mitigar estas vibraciones.

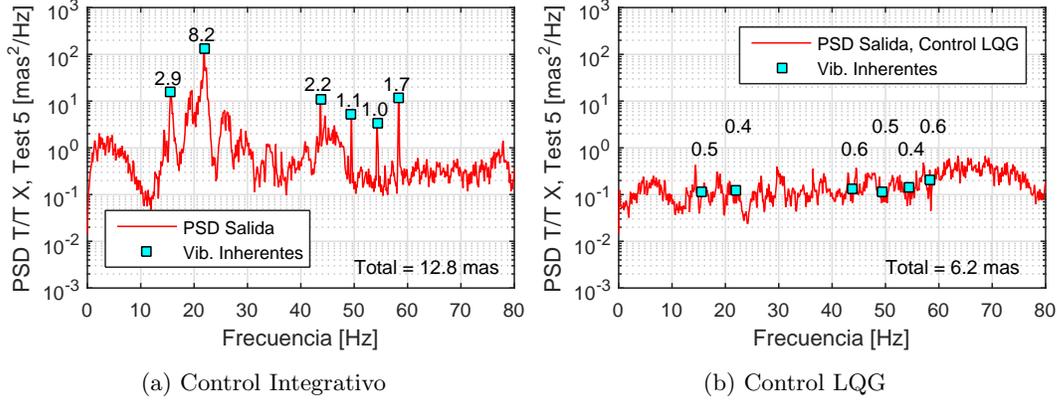


Figura 6.5: Mitigación de peaks de vibraciones inherentes en PSDs de datos de salida, por implementación de control LQG. Simulación de modelo lineal de sistema MagAO, datos de Test 5.

Los valores RMS de los peaks de vibración presentados en la Figura 6.5 son considerablemente menores en el resultado de salida del sistema, vía simulación de control LQG. Por lo tanto, la simulación sugiere que esta alternativa de control es capaz de mitigar las vibraciones observadas en los datos de salida reales.

No obstante, es necesario mencionar que no todas las componentes frecuenciales observadas en la salida real son mitigadas por el controlador LQG. Como se observa en la Figura 6.4, existen componentes de frecuencia en la salida (principalmente, en las bandas superiores, mayores a 100 [Hz]) cuya potencia media asociada es mayor en el caso de control LQG que en los datos reales.

Esto se debe a que el lazo de control de óptica adaptativa está sujeto al Teorema de la Integral de Bode [38].

La función de transferencia $H_{ym}(z)$ se ha definido en la ecuación (5.2.4) para un controlador integrativo. Esta función describe la relación entre la PSD de la salida y las PSDs de la fase incidente y el ruido de medición, resultado presentado en la ecuación (5.2.6).

La ecuación (6.2.1) presenta nuevamente el resultado de (5.2.6), definiendo $H_{yw}(z)$ de forma general, para un controlador con función de transferencia $C(z)$.

$$\begin{aligned} \langle |y(j\omega)|^2 \rangle &= |H_{yw}(j\omega)|^2 (D^2 \langle |\varphi(j\omega)|^2 \rangle + \langle |w(j\omega)|^2 \rangle) \\ H_{yw}(z) &= \frac{1}{1 + DNC(z)z^{-3}} \end{aligned} \quad (6.2.1)$$

Se tiene que $H_{yw}(z)$ tiene la forma $S(z) = (1 + L(z)z^{-d})^{-1}$, con $L(z) = DNC(z)$ y $d = 3$. El Teorema de la Integral de Bode [44] indica que para cualquier elección de $L(z)$ estable, para $d > 1$, la integral del logaritmo del módulo de $S(j\omega)$ en el rango de frecuencias normalizadas $\omega \in [0, \pi]$ es igual a cero.

$$\int_0^{\pi} \log |S(j\omega)| d\omega = 0 \quad (6.2.2)$$

Esto significa que $|H_{yw}(j\omega)|$ no es capaz de mitigar la fase incidente en la salida para todas las frecuencias, y que diseñar el controlador para atenuar ciertas frecuencias significa amplificar la perturbación para otra parte del espectro. Este efecto de “cama de agua” es inherente al lazo, independiente del controlador.

El controlador óptimo LQG no se escapa del efecto de “cama de agua”. Sin embargo, provee un compromiso óptimo entre rechazo y amplificación de la perturbación, disminuyendo la potencia media total de la salida.

6.2.2. Sistema ante Vibraciones Adicionales

El sistema de control LQG ha sido diseñado en base a un modelo de la fase incidente. Este modelo ha sido adquirido a partir de datos capturados del Test de captura 5, por lo que sólo considera la presencia de vibraciones inherentes.

A continuación, se presenta el funcionamiento del sistema de control ante vibraciones adicionales al sistema, inducidas por instrumentos. Esto permite evaluar la robustez del esquema de control propuesto. Para ello, se emplea como entrada al sistema de lazo cerrado de MagAO una estimación de la fase incidente a partir de datos del Test de captura 8. De esta forma, el sistema recibe no sólo vibraciones inherentes, sino también adicionales.

A. Simulación de Control Integrativo, Test 8

Se implementa control integrativo para los datos del Test 8 con el propósito de verificar que la PSD de la salida obtenida corresponde a la PSD de la salida real para este test de captura.

El resultado se presenta en la Figura 6.6, adjudicando las diferencias observadas a la estimación de la fase incidente a partir de interpolación de datos de salida.

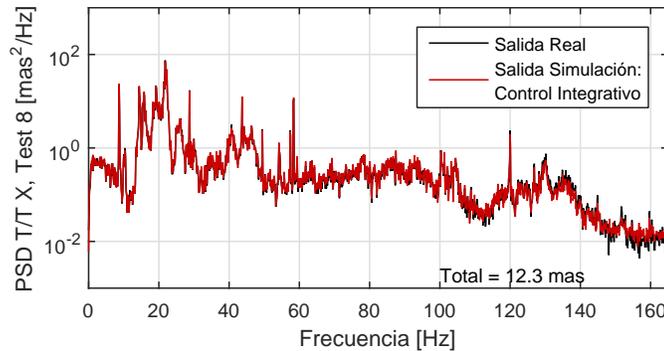


Figura 6.6: PSDs de salida real y salida por simulación, bajo control integrativo, para datos de Test 8. Valor RMS total es indicado.

B. Simulación de Control LQG, Test 8

Se implementa la estrategia de control LQG, para los datos de Test 8. La Figura 6.4 presenta la PSD de la salida obtenida de la simulación de control LQG.

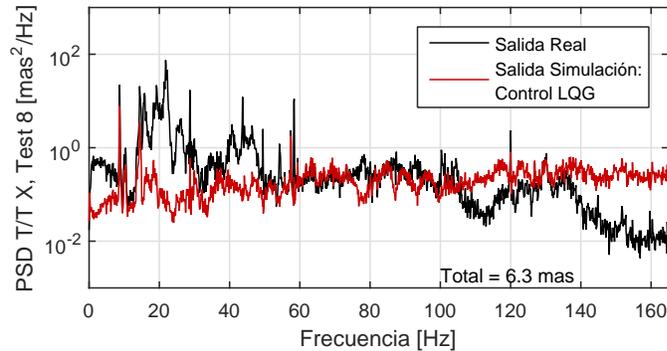


Figura 6.7: PSDs de salida real y salida por simulación, bajo control LQG. Datos de Test 8. Valor RMS total es indicado.

Nuevamente, el sistema de control LQG genera una salida de menor valor RMS (6.3 [mas]) que su contraparte de control integrativo (12.3 [mas]). Sin embargo, a diferencia que el caso anterior basado en datos del Test 5, existen peaks de frecuencia en la salida del sistema. Éstos corresponden a los peaks de vibraciones adicionales, no considerados en el diseño del sistema de control LQG.

La Figura 6.8 presenta los peaks adicionales presentes en los datos de salida para ambas alternativas de control. Éstos peaks han sido previamente identificados en la Sección 4.3.4. Su valor RMS es también indicado.

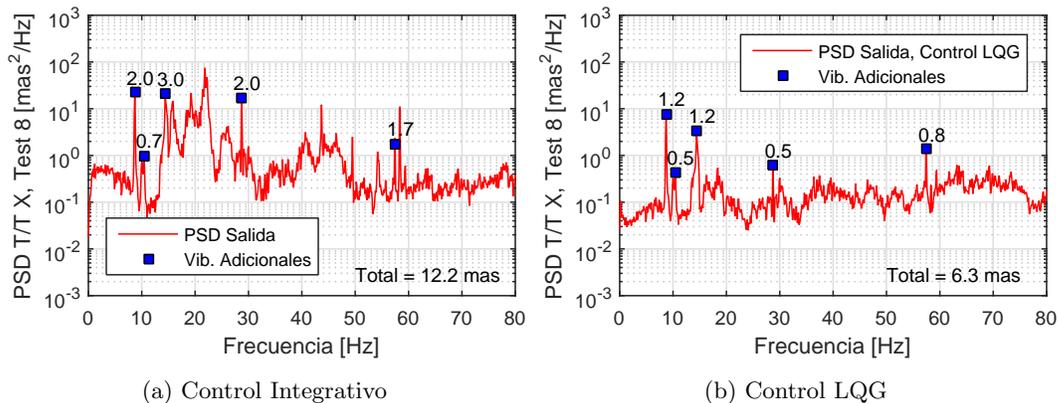


Figura 6.8: Identificación de peaks de vibraciones adicionales en PSDs de datos de salida. Simulación de modelo lineal de sistema MagAO, datos de Test 8.

Es posible observar que las vibraciones inherentes son levemente mitigadas en el resultado

de control LQG, aún sin haberlas considerado en el modelo.

Por otro lado, las vibraciones inherentes también están presentes en la salida del sistema con control integrativo. Pero como se puede observar en el resultado de la Figura 6.9b, son mitigadas por el sistema de control LQG.

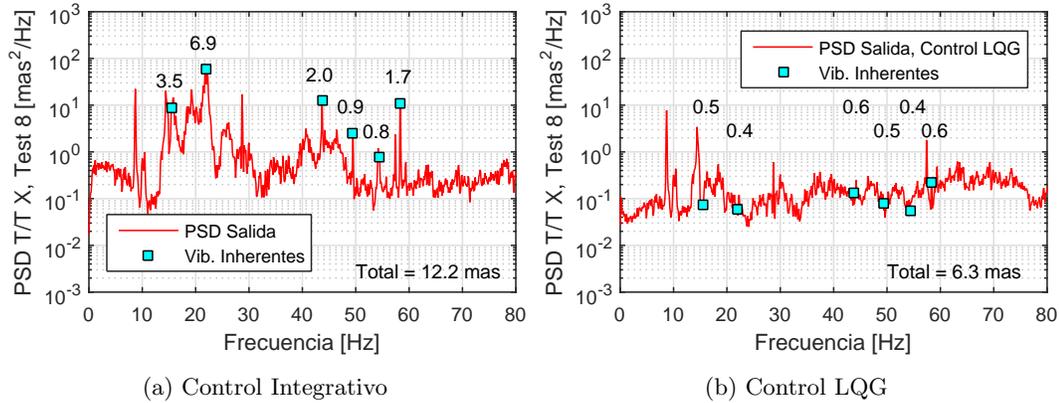


Figura 6.9: Mitigación de peaks de vibraciones inherentes en PSDs de datos de salida. Simulación de modelo lineal de sistema MagAO, datos de Test 8.

Al igual que el caso del Test 5, el sistema está sujeto al efecto de “cama de agua”, lo que genera una amplificación de la perturbación de entrada a frecuencias altas (Figura 6.7).

No obstante, el controlador LQG es capaz de generar una salida de menor potencia media total, mitigando no sólo las vibraciones inherentes del sistema, sino también (en menor medida) las vibraciones adicionales inducidas por los instrumentos.

6.3. Resumen del Capítulo

La alternativa de control LQG diseñada para el sistema MagAO ha permitido otorgar, a través de una implementación en simulación, mejores resultados que el controlador integrativo. Los resultados obtenidos presentan una menor potencia media, lo que se traduce en menor varianza de los datos temporales. Adicionalmente, las vibraciones inherentes principales presentes en la salida son mitigadas.

El diseño del controlador LQG no habría sido posible sin el modelo lineal para el lazo de control de MagAO y para la fase incidente, obtenidos en el Capítulo 5. Específicamente, el modelo de la fase incidente es quien permite al controlador LQG estimar el comportamiento temporal de la fase y generar una actuación que permita contrarrestar su efecto.

Para implementar la simulación de esta alternativa de control, se ha estimado la fase incidente a través de un proceso de interpolación de los datos de salida. Para ello, es necesario contar con la suposición que no existen componentes frecuenciales de magnitud significativa a frecuencias mayores que 165 [Hz], pues los datos de salida sólo entregan información hasta esa frecuencia. También es necesario definir un valor para el factor D del modelo lineal del WFS, pues la estimación de la fase depende de este factor. La elección de D ha sido un

criterio de diseño, y un cambio en su valor generaría una fase incidente de distinta varianza, pero densidad espectral de potencia con las mismas magnitudes relativas.

La alternativa de control LQG para distintos sistemas de óptica adaptativa ha sido no sólo simulada o implementada en laboratorio [15], sino que también ha sido validada en implementaciones reales, como por ejemplo, para el sistema de óptica adaptativa SCAO [14]. Estos resultados sugieren que el sistema de control integrativo presente en MagAO puede ser actualizado por un sistema de control óptimo, como el sistema LQG presentado, mejorando así su desempeño.

Los primeros pasos realizados en el proceso de diseño de control óptimo del sistema MagAO han sido publicados en [18], a presentar en la conferencia SPIE Astronomical Instrumentation + Telescopes 2016 en Edimburgo, Escocia.

CONCLUSIONES

A partir del análisis frecuencial de los datos adquiridos de MagAO, así como también de los modelos lineales obtenidos, ha sido posible diseñar una propuesta de control óptimo para MagAO. Ésta ha sido validada vía simulación, entregando mejores resultados en términos de mitigación de varianza del error que el sistema de control actualmente implementado en MagAO.

De esta forma, se cumple el objetivo de la Tesis de proponer mejoras para el sistema MagAO para la obtención de imágenes científicas de mejor calidad.

Previo al análisis frecuencial de los datos capturados, se han introducido los conceptos asociados al sistema MagAO, y de forma general, a los sistemas astronómicos, el problema de turbulencia atmosférica y vibraciones, y la tecnología de óptica adaptativa. Este estudio permite conocer la tecnología y el diseño del telescopio Clay y el sistema MagAO, y la naturaleza de los datos capturados que han sido la base de este trabajo.

Los datos capturados por la cámara VisAO y el sensor de frente de onda durante las sesiones de observación han permitido un análisis detallado de la presencia de vibraciones inherentes y vibraciones inducidas por instrumentos. Ha sido posible conocer el impacto que tienen estas vibraciones en el resultado de MagAO, en términos de su valor RMS en unidades angulares de [mas]. Así, es posible medir y corroborar el funcionamiento correcto del sistema de óptica adaptativa, y la resolución que es capaz de generar en sus resultados gráficos.

Adicionalmente, ha sido obtenido un modelo lineal para el sistema MagAO, en base a un lazo de control estándar, y a la estrategia de amplitudes modales. La obtención de datos de captura previos y posteriores a una optimización de ganancia del controlador de MagAO ha sido esencial para estimar el modelo lineal de MagAO. Sin embargo, este modelo puede ser mejorado, conociendo la dinámica de los sensores de MagAO, como también disponiendo de datos de captura adicionales.

A partir de este modelo, se ha estimado la fase incidente al sistema. Un análisis frecuencial de esta fase permite la obtención de un modelo lineal para su correlación temporal. Este modelo es una simplificación de la dinámica involucrada en la perturbación de fase producto de la turbulencia atmosférica. Sin embargo, resultados obtenidos en implementaciones de otros sistemas de óptica adaptativa sugieren que el modelo lineal obtenido es adecuado para poder ser usado como base en el diseño de un sistema de control.

El controlador óptimo diseñado tiene por objetivo mitigar las vibraciones inherentes identificadas en el análisis frecuencial de los datos capturados. Sin embargo, no escapa del

efecto de “cama de agua” impuesto por el Teorema de la Integral de Bode, generando que mitigación a ciertas frecuencias signifique amplificación de la perturbación para otras bandas. Entonces, el diseño del controlador provee un compromiso entre mitigación y amplificación de la perturbación de fase.

7.1. Trabajo Futuro

El análisis frecuencial de los datos capturados por los sensores de MagAO puede ser extendido, disponiendo de datos bajo nuevas condiciones de operación, como también de distintas noches de observación. Adicionalmente, la obtención de datos a una frecuencia de captura cercana o igual a la frecuencia de funcionamiento del lazo permitiría conocer la existencia de componentes frecuenciales superiores, validando o no las suposiciones realizadas en el análisis realizado.

El modelo lineal del sistema MagAO ha sido diseñado en base a la información limitada disponible, y por esta razón, es válido bajo supuestos determinados. Conocimiento de la dinámica de los sensores de MagAO, así como la obtención de datos de captura adicionales bajo distintas condiciones de operación, permitirían la obtención de un mejor modelo para MagAO.

Con la disponibilidad de un modelo preciso para MagAO, y el diseño de un controlador óptimo (el controlador LQG analizado en esta Tesis u otra alternativa), el próximo paso sería poner en práctica los nuevos diseños de control, y así, implementar técnicas de mitigación de vibraciones en el sistema.

El análisis frecuencial aquí presentado, así como la obtención de modelos lineales y propuestas de control, no es un análisis exclusivo para MagAO, sino que puede extenderse a otros sistemas de óptica adaptativa. Se espera que los proyectos astronómicos en desarrollo, como el Giant Magellan Telescope, implementen tecnologías de control óptimo en su diseño. Por lo tanto, un análisis similar al presentado en esta Tesis será necesario para la implementación de mitigación de vibraciones en estos sistemas de óptica adaptativa. Así, será posible superar las limitaciones que caracterizan a los sistemas actuales y obtener imágenes científicas que generen nuevos resultados de investigación astronómica en el futuro.

REFERENCIAS

- [1] K. Morzinski, L. Close, J. Males, D. Kopon, P. Hinz, S. Esposito, A. Riccardi, A. Puglisi, E. Pinna, R. Briguglio, M. Xompero, F. Quirós-Pacheco, V. Bailey, K. Follette, T. Rodigas, Y. Wu, C. Arcidiacono, J. Argomedo, L. Busoni, T. Hare, A. Uomoto, and A. Weinberger, *MagAO: Status and on-sky performance of the Magellan adaptive optics system*. SPIE, 2014, vol. 9148.
- [2] L. M. Close, J. R. Males, K. Morzinski, D. Kopon, K. Follette, T. J. Rodigas, P. Hinz, Y.-L. Wu, A. Puglisi, S. Esposito, A. Riccardi, E. Pinna, M. Xompero, R. Briguglio, A. Uomoto, and T. Hare, “Diffraction-limited visible light images of orion trapezium cluster with the magellan adaptive secondary adaptive optics system (magao),” *The Astrophysical Journal*, vol. 774, no. 2, p. 94, 2013. [Online]. Available: <http://stacks.iop.org/0004-637X/774/i=2/a=94>
- [3] L. M. Close, V. Gasho, D. Kopon, P. M. Hinz, W. F. Hoffmann, A. Uomoto, and T. Hare, “The magellan telescope adaptive secondary ao system,” pp. 70 150Y–70 150Y–12, 2008. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1117/12.789527>
- [4] D. Kopon, L. M. Close, and V. Gasho, “An advanced atmospheric dispersion corrector for extreme ao,” pp. 70 156M–70 156M–11, 2008. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1117/12.790215>
- [5] L. Close, J. Males, D. Kopon, V. Gasho, K. Follette, P. Hinz, K. Morzinski, A. Uomoto, T. Hare, A. Riccardi, S. Esposito, A. Puglisi, E. Pinna, L. Busoni, C. Arcidiacono, M. Xompero, R. Briguglio, F. Quiros-Pacheco, and J. Argomedo, *First closed-loop visible AO test results for the advanced adaptive secondary AO system for the Magellan Telescope: MagAO’s performance and status*, 2012, vol. 8447.
- [6] D. Kopon, L. M. Close, J. Males, V. Gasho, K. Morzinski, and K. Follette, “Status update and closed-loop performance of the magellan adaptive optics visao camera,” pp. 84 473D–84 473D–15, 2012. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1117/12.926446>
- [7] J. R. Males, L. M. Close, D. Kopon, F. Quiros-Pacheco, A. Riccardi, M. Xompero, A. Puglisi, V. Gasho, K. M. Morzinski, and K. B. Follette, “Laboratory demonstration of real time frame selection with magellan ao,” pp. 844 742–844 742–12, 2012. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1117/12.926698>

- [8] J. Males, L. Close, O. Guyon, K. Morzinski, A. Puglisi, P. Hinz, K. Follette, J. Monnier, V. Tolls, T. Rodigas, A. Weinberger, A. Boss, D. Kopon, Y. Wu, S. Esposito, A. Riccardi, M. Xompero, R. Briguglio, and E. Pinna, *Direct imaging of exoplanets in the habitable zone with adaptive optics*. SPIE, 2014, vol. 9148.
- [9] K. M. Morzinski, J. R. Males, A. J. Skemer, L. M. Close, P. M. Hinz, T. J. Rodigas, A. Puglisi, S. Esposito, A. Riccardi, E. Pinna, M. Xompero, R. Briguglio, V. P. Bailey, K. B. Follette, D. Kopon, A. J. Weinberger, and Y.-L. Wu, “Magellan adaptive optics first-light observations of the exoplanet β pic b. ii. 3–5 μ m direct imaging with magao+clio, and the empirical bolometric luminosity of a self-luminous giant planet,” *The Astrophysical Journal*, vol. 815, no. 2, p. 108, 2015. [Online]. Available: <http://stacks.iop.org/0004-637X/815/i=2/a=108>
- [10] Y.-L. Wu, L. M. Close, J. R. Males, T. S. Barman, K. M. Morzinski, K. B. Follette, V. P. Bailey, T. J. Rodigas, P. Hinz, A. Puglisi, M. Xompero, and R. Briguglio, “New extinction and mass estimates of the low-mass companion 1rxs 1609 b with the magellan ao system: Evidence of an inclined dust disk,” *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 807, no. 1, p. L13, 2015. [Online]. Available: <http://stacks.iop.org/2041-8205/807/i=1/a=L13>
- [11] T. J. Rodigas, C. C. Stark, A. Weinberger, J. H. Debes, P. M. Hinz, L. Close, C. Chen, P. S. Smith, J. R. Males, A. J. Skemer, A. Puglisi, K. B. Follette, K. Morzinski, Y.-L. Wu, R. Briguglio, S. Esposito, E. Pinna, A. Riccardi, G. Schneider, and M. Xompero, “On the morphology and chemical composition of the hr 4796a debris disk,” *The Astrophysical Journal*, vol. 798, no. 2, p. 96, 2015. [Online]. Available: <http://stacks.iop.org/0004-637X/798/i=2/a=96>
- [12] A. Guesalaga, B. Neichel, F. Rigaut, J. Osborn, and D. Guzman, “Design of frequency-based controllers for vibration mitigation at the gemini-south telescope,” pp. 844 711–844 711–16, 2012. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1117/12.924909>
- [13] —, “Comparison of vibration mitigation controllers for adaptive optics systems,” *Appl. Opt.*, vol. 51, no. 19, pp. 4520–4535, Jul 2012. [Online]. Available: <http://ao.osa.org/abstract.cfm?URI=ao-51-19-4520>
- [14] G. Sivo, C. Kulcsár, J.-M. Conan, H.-F. Raynaud, Éric Gendron, A. Basden, F. Vidal, T. Morris, S. Meimon, C. Petit, D. Gratadour, O. Martin, Z. Hubert, A. Sevin, D. Perret, F. Chemla, G. Rousset, N. Dipper, G. Talbot, E. Younger, R. Myers, D. Henry, S. Todd, D. Atkinson, C. Dickson, and A. Longmore, “First on-sky scao validation of full lqg control with vibration mitigation on the canary pathfinder,” *Opt. Express*, vol. 22, no. 19, pp. 23 565–23 591, Sep 2014. [Online]. Available: <http://www.opticsexpress.org/abstract.cfm?URI=oe-22-19-23565>
- [15] C. Petit, J.-M. Conan, C. Kulcsár, H.-F. Raynaud, and T. Fusco, “First laboratory validation of vibration filtering with lqg control law for adaptive optics,” *Opt. Express*, vol. 16, no. 1, pp. 87–97, Jan 2008. [Online]. Available: <http://www.opticsexpress.org/abstract.cfm?URI=oe-16-1-87>

- [16] S. Zuniga, J. Garces, L. M. Close, J. R. Males, K. M. Morzinski, P. Escarate, and M. Castro, "Vibrations in magao: analysis of on-sky data and future challenges in vibrations mitigation," in *Imaging and Applied Optics 2015*. Optical Society of America, 2015, p. AOT1D.4. [Online]. Available: <http://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=AOMS-2015-AOT1D.4>
- [17] J. Garces, S. Zuniga, L. M. Close, J. R. Males, K. M. Morzinski, P. Escarate, and M. Castro, "Vibrations in magao: resonance sources identification through frequency-based analysis," in *Imaging and Applied Optics 2015*. Optical Society of America, 2015, p. AOT1D.3. [Online]. Available: <http://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=AOMS-2015-AOT1D.3>
- [18] J. Garcés, S. Zúñiga, L. M. Close, J. R. Males, K. M. Morzinski, P. Escarate, M. Castro, J. Marchioni, and D. Rojas, "Vibrations in magao: resonance sources identification and first approaches for modeling and control," *Proc. SPIE*, 2016.
- [19] A. Okumura, K. Noda, and C. Rulten, "ROBAST: Development of a Non-Sequential Ray-Tracing Simulation Library and its Applications in the Cherenkov Telescope Array," in *Proceedings, 34th International Cosmic Ray Conference (ICRC 2015)*, 2015. [Online]. Available: <http://inspirehep.net/record/1391227/files/arXiv:1508.07803.pdf>
- [20] F. Roddier, "The effects of atmospheric turbulence in optical astronomy," *Progress in optics. Volume 19. Amsterdam, North-Holland Publishing Co., 1981, p. 281-376.*, vol. 19, pp. 281–376, 1981.
- [21] J.-M. Conan, G. Rousset, and P.-Y. Madec, "Wave-front temporal spectra in high-resolution imaging through turbulence," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 12, no. 7, pp. 1559–1570, Jul 1995. [Online]. Available: <http://josaa.osa.org/abstract.cfm?URI=josaa-12-7-1559>
- [22] J. Hardy, *Adaptive Optics for Astronomical Telescopes*, ser. Oxford series in optical and imaging sciences. Oxford University Press, 1998. [Online]. Available: https://books.google.co.uk/books?id=-0aAWyckS_8C
- [23] M. Lombardo and G. Lombardo, "New methods and techniques for sensing the wave aberrations of human eyes," *Clinical and Experimental Optometry*, vol. 92, no. 3, pp. 176–186, 5 2009.
- [24] P.-Y. Madec, "Overview of deformable mirror technologies for adaptive optics," in *Imaging and Applied Optics 2015*. Optical Society of America, 2015, p. AOT2C.1. [Online]. Available: <http://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=AOMS-2015-AOT2C.1>
- [25] D. Brousseau, E. F. Borra, S. Thibault, A. M. Ritcey, J. Parent, O. Seddiki, J.-P. Déry, L. Faucher, J. Vassallo, and A. Naderian, "Wavefront correction with a ferrofluid deformable mirror: experimental results and recent developments," pp. 70 153J–70 153J–6, 2008. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1117/12.787840>
- [26] G.-M. Dai, "Modal wave-front reconstruction with Zernike polynomials and Karhunen-Loeve functions," *Journal of the Optical Society of America A*, vol. 13, pp. 1218–1225, Jun. 1996.

- [27] G. P. David J. E. Floyd, Jo Thomas-Osip, “Seeing, wind, and outer scale effects on image quality at the magellan telescopes,” *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, vol. 122, no. 892, pp. 731–742, 2010. [Online]. Available: <http://www.jstor.org/stable/10.1086/653740>
- [28] L. M. Close, V. Gasho, D. Kopon, J. Males, K. B. Follette, K. Brutlag, A. Uomoto, and T. Hare, “The magellan telescope adaptive secondary ao system: a visible and mid-ir ao facility,” pp. 773 605–773 605–12, 2010. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1117/12.857924>
- [29] D. Kopon, L. M. Close, J. R. Males, and V. Gasho, “Design, implementation, and on-sky performance of an advanced apochromatic triplet atmospheric dispersion corrector for the magellan adaptive optics system and visao camera,” *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, vol. 125, no. 930, pp. 966–975, 2013. [Online]. Available: <http://www.jstor.org/stable/10.1086/672091>
- [30] J. M. Stone, A. J. Skemer, K. M. Kratter, T. J. Dupuy, L. M. Close, J. A. Eisner, J. J. Fortney, P. M. Hinz, J. R. Males, C. V. Morley, K. M. Morzinski, and K. Ward-Duong, “Adaptive optics imaging of vhs 1256-1257: A low mass companion to a brown dwarf binary system,” *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 818, no. 1, p. L12, 2016. [Online]. Available: <http://stacks.iop.org/2041-8205/818/i=1/a=L12>
- [31] L. M. Close, J. R. Males, K. Morzinski, D. Kopon, K. Follette, T. J. Rodigas, P. Hinz, Y.-L. Wu, A. Puglisi, S. Esposito, A. Riccardi, E. Pinna, M. Xompero, R. Briguglio, A. Uomoto, and T. Hare, “Diffraction-limited visible light images of orion trapezium cluster with the magellan adaptive secondary adaptive optics system (magao),” *The Astrophysical Journal*, vol. 774, no. 2, p. 94, 2013. [Online]. Available: <http://stacks.iop.org/0004-637X/774/i=2/a=94>
- [32] J. R. Males, L. M. Close, K. M. Morzinski, Z. Wahhaj, M. C. Liu, A. J. Skemer, D. Kopon, K. B. Follette, A. Puglisi, S. Esposito, A. Riccardi, E. Pinna, M. Xompero, R. Briguglio, B. A. Biller, E. L. Nielsen, P. M. Hinz, T. J. Rodigas, T. L. Hayward, M. Chun, C. Ftaclas, D. W. Toomey, and Y.-L. Wu, “Magellan adaptive optics first-light observations of the exoplanet β pic b. i. direct imaging in the far-red optical with magao+visao and in the near-ir with nici,” *The Astrophysical Journal*, vol. 786, no. 1, p. 32, 2014. [Online]. Available: <http://stacks.iop.org/0004-637X/786/i=1/a=32>
- [33] A. J. Skemer, M. S. Marley, P. M. Hinz, K. M. Morzinski, M. F. Skrutskie, J. M. Leisenring, L. M. Close, D. Saumon, V. P. Bailey, R. Briguglio, D. Defrere, S. Esposito, K. B. Follette, J. M. Hill, J. R. Males, A. Puglisi, T. J. Rodigas, and M. Xompero, “Directly imaged l-t transition exoplanets in the mid-infrared,” *The Astrophysical Journal*, vol. 792, no. 1, p. 17, 2014. [Online]. Available: <http://stacks.iop.org/0004-637X/792/i=1/a=17>
- [34] V. Bailey, T. Meshkat, M. Reiter, K. Morzinski, J. Males, K. Y. L. Su, P. M. Hinz, M. Kenworthy, D. Stark, E. Mamajek, R. Briguglio, L. M. Close, K. B. Follette, A. Puglisi, T. Rodigas, A. J. Weinberger, and M. Xompero, “Hd 106906 b: A planetary-mass

- companion outside a massive debris disk,” *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 780, no. 1, p. L4, 2014. [Online]. Available: <http://stacks.iop.org/2041-8205/780/i=1/a=L4>
- [35] P. Stoica and R. L. Moses, *Introduction to spectral analysis*. Upper Saddle River, N.J. Prentice Hall, 1997. [Online]. Available: <http://opac.inria.fr/record=b1092427>
- [36] C. P. William T. Thomson, Marie Dillon Dahleh and J. Vlissides, *Theory of Vibrations with Applications*, 5th ed. Pearson Education, 1998.
- [37] P. D. Welch, “The use of fast fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms,” *IEEE Transactions on audio and electroacoustics*, vol. 15, no. 2, pp. 70–73, 1967.
- [38] C. Kulcsár, H.-F. Raynaud, C. Petit, J.-M. Conan, and P. V. de Lesegno, “Optimal control, observers and integrators in adaptive optics,” pp. 7464–7476, Aug 2006. [Online]. Available: <http://www.opticsexpress.org/abstract.cfm?URI=oe-14-17-7464>
- [39] E. Gendron and P. Lena, “Astronomical adaptive optics. 1: Modal control optimization,” *aap*, vol. 291, pp. 337–347, Nov. 1994.
- [40] B. L. Roux, C. Kulcsár, L. M. Mugnier, T. Fusco, H.-F. Raynaud, and J.-M. Conan, “Optimal control law for classical and multiconjugate adaptive optics,” *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 21, no. 7, pp. 1261–1276, Jul 2004. [Online]. Available: <http://josaa.osa.org/abstract.cfm?URI=josaa-21-7-1261>
- [41] C. Kulcsár, H.-F. Raynaud, J.-M. Conan, C. Correia, and C. Petit, “Control design and turbulent phase models in adaptive optics: A state-space interpretation,” in *Frontiers in Optics 2009/Laser Science XXV/Fall 2009 OSA Optics & Photonics Technical Digest*. Optical Society of America, 2009, p. AOWB1. [Online]. Available: <http://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=AOPT-2009-AOWB1>
- [42] L. Poyneer and J.-P. Véran, “Predictive wavefront control for adaptive optics with arbitrary control loop delays,” *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 25, no. 7, pp. 1486–1496, Jul 2008. [Online]. Available: <http://josaa.osa.org/abstract.cfm?URI=josaa-25-7-1486>
- [43] C. Kulcsár, H.-F. Raynaud, C. Petit, and J.-M. Conan, “Minimum variance control in presence of actuator saturation in adaptive optics,” pp. 70 151G–70 151G–8, 2008. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1117/12.789215>
- [44] C. Mohtadi, “Bode’s integral theorem for discrete-time systems,” *IEE Proceedings D - Control Theory and Applications*, vol. 137, no. 2, pp. 57–66, Mar 1990.