

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA

**CONTROL DE PERTURBACIONES DE ALTA
FRECUENCIA DE TIP & TILT EN SISTEMAS
ÓPTICOS USANDO FAST STEERING MIRROR**

Tesis de Grado presentada por

Mario Andrés Castro Romero

como requisito parcial para optar al grado de

Magíster en Ciencias de la Ingeniería Electrónica

Profesor Guía

Dr. Pedro Escárate Monetta

Profesor Co-guía

Dr. Juan Yuz Eissmann

Dr. Michel Curé

Valparaíso, 2016.

TÍTULO DE LA TESIS:

**CONTROL DE PERTURBACIONES DE ALTA FRECUENCIA
DE TIP & TILT EN SISTEMAS ÓPTICOS USANDO FAST STEE-
RING MIRROR.**

AUTOR:

Mario Andrés Castro Romero

TRABAJO DE TESIS, presentado en cumplimiento parcial del requisito para el grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería Electrónica de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Dr. Pedro Escárate M.

Dr. Juan Yuz E.

Dr. Michel Curé.

Valparaíso, Septiembre de 2016.

AGRADECIMIENTOS

Ahora culmina una gran etapa en mi vida que me permitió crecer como persona y profesionalmente. Es justo agradecer a todos quienes formaron parte de ella. Son tantas personas que es difícil nombrarlas a cada una, así que si lees esto y sabes que de alguna forma fuiste parte de este proceso, en lo personal o en lo académico, te expreso mi más sentido agradecimiento y cariño.

En primer lugar, agradecer a mi familia, mami, papi, Taty y tios por el cariño y apoyo incondicional dado siempre. Me siento afortunado de tenerlos. Sin su apoyo no sería esto posible, ni nada.

También agradecer a los amigos que estuvieron presente durante todo el proceso universitario. A los compañeros de departamento Germán, SebaG y Toño, y a tantas otras personas con las cuales compartí durante tantos años momentos de estudio, estrés, pena, alegría, carrete y relajo. Son, sin duda, tan o más valiosos que cualquier título o grado que pudiese obtener.

Agradecer también el apoyo al profesor Dr. Pedro Escárate no solamente por el conocimiento compartido, también por el apoyo, la confianza y la motivación entregada a lo largo de este tiempo. Al profesor Andrés Guesalaga, por su buena disposición para recibirme en Santiago y facilitar parte de sus instrumentos. Por supuesto agradecer también a los compañeros que pasaron por el laboratorio y que siempre hicieron más ameno el trabajo: SebaZ, Javier, Diego, José.

Se agradece el soporte económico entregado por la USM a través de los fondos para asistencia a congresos del Departamento de Electrónica y de la Dirección General de Investigación y Postgrado. También se agradece a CONICYT por su financiamiento de arancel y matrícula a través de su Beca Magíster Nacional 2014.

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	II
ÍNDICE DE FIGURAS	VI
ÍNDICE DE CUADROS	VIII
ABSTRACT	IX
RESUMEN	X
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Estado del arte	1
1.2. Identificación de problemas	4
1.3. Organización del documento	4
2. MARCO TEÓRICO	5
2.1. Introducción	5
2.2. Observación Astronómica	5
2.2.1. Polinomios de Zernike	8
2.3. Óptica adaptativa	10
2.3.1. Laser Guide Star	10
2.3.2. Sensores de Frente de Onda	11
2.3.3. Espejos Deformables	13
2.3.4. Lazo de Control de AO	14
2.4. Vibraciones en Sistemas de AO	15
3. SETUP EXPERIMENTAL	19
3.1. Introducción	19
3.2. Descripción del setup experimental	19
3.2.1. Fuente Laser y Beam Expander	20
3.2.2. Beam Splitter	21
3.2.3. Espejo Deformable	21
3.2.4. Lentes	22

3.2.5. Fuente de Vibración	23
3.2.6. Sensor de Frente de Onda	23
3.2.7. Fast Steering Mirror	24
3.2.8. Cámara CMOS	25
3.3. Control propuesto	26
3.3.1. Medición y compensación de modos Tip & Tilt	26
4. RESULTADOS	29
4.1. resultados	32
5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	35
5.1. Conclusiones	35
5.2. Trabajo futuro	35
A. APÉNDICE	37
REFERENCIAS	47

Índice de figuras

1.1. Enfriador y el modelo del enfriador. A la derecha se muestra el sistema de control	3
1.2. TVA montado sobre un enfriador criogenico del GPI	3
2.1. Ejemplo de patrón de difracción a través de una apertura circular. Al centro el Disco de Airy	6
2.2. Ejemplo de Strehl Ratio $S = 0.7$	7
2.3. Estadísticas del seeing medido en Paranal (color negro) y La Silla (color rojo).	8
2.4. Frente de onda plano	8
2.5. Ilustración piramidal de Polinomios de Zernikes hasta el séptimo orden. La notación contiene el coeficiente (Z), el orden (subíndice) y la frecuencia radial (superíndice)	9
2.6. Laser Guide Star	11
2.7. 4 Laser Guide Star (L1, L2, L3 y L4) en VLT UT4	11
2.8. Funcionamiento SHWFS	12
2.9. Funcionamiento del PWFS	13
2.10. Espejo deformable bimorfo	13
2.11. Espejo deformable MEMS	14
2.12. Sistema de Óptica Adaptativa.	14
2.13. Comparación de la observación astronómica sin y con óptica adaptiva. Imagen de Neptuno	15
2.14. Densidad espectral de potencia de los modos tip tilt medidos en VLT MA-CAO. Muestreo a 420 Hz	16
2.15. Vibraciones sobre el espejo secundario	16
2.16. Aceleración medida sobre el espejo primario con GPI montado	17
3.1. Setup Experimental. (1): Fuente Laser y Beam Expander, (2): Beam Splitter 1, (3): Espejo Deformable, (4): Lente 1, (5): Lente 2, (6): Fuente de Vibración, (7): Beam Splitter 2, (8): Sensor de Frente de Onda, (9): Fast Steering Mirror, (10): Lente 3, (11): Camara CMOS	20
3.3. Beam Splitter CM1-BS013	21
3.4. Sección transversal de la estructura interna del espejo DMP40	22

3.6. Fuente de vibración	23
3.7. Sensor de Frente de Onda WFS20-5C/M	23
3.9. Xontrolador FSM-CD300B	24
3.10. 1208HS-4AO	25
3.11. Camara CMOS Edmund Optics 0413C Lite Edition	25
3.12. Esquema de Control	26
3.13. Ejemplo de desviación en el Haz	27
3.14. Tiempos de loop	28
4.1. Lazo de control programado en matlab	30
4.2. Densidad espectral de potencia de la posición del sin control en ambos ejes	32
4.3. Densidad Espectral de Potencia del movimiento del centroide con control en ambos ejes	33
4.4. Desempeño del lazo de control	33

Índice de cuadros

2.1. Algunos polinomios de Zernike	10
4.1. Sintonización Ziegler-Nichols, método de la oscilación.	31
4.2. Resumen	34

ABSTRACT

The Adaptive Optics (AO) technology was conceived for the improvement in the astronomical images acquired by the optical telescopes via the compensation of atmospheric turbulence. With the development of the associated technology, the AO allowed us to obtain images near the physical diffraction limit. Once the AO achieved successfully the compensation of atmospheric turbulence, other problems gain more importance, being the most important the problem of the vibrations in the optical system, produced by a number of factors that most of the time are difficult to establish. These structural vibrations induce aberration mainly in tip-tilt modes that reduce the accuracy of the astronomical instrument. Therefore, control actions need to be taken.

With this purpose we present a laboratory demonstration of vibration rejection of tip-tilt modes using closed-loop control, inducing vibration on the test bench via an eccentric motor with controllable frequency, in order to simulate the structural vibrations mentioned above. We measure the laser vibration and its tip-tilt aberration using a CMOS camera. The control action is carried out by a Fast Steering Mirror (FSM).

Keywords:

Adaptive optics, Closed loop control, fast steering mirror, tip-tilt aberration.

RESUMEN

La Óptica Adaptativa (AO) fue una técnica concebida para mejorar la calidad de las imágenes astronómicas obtenidas por telescopios ópticos, mediante la compensación de las perturbaciones producidas por la turbulencia atmosférica. Con el desarrollo de la instrumentación asociada la AO permitió obtener imágenes cuya calidad esta cerca del límite físico puesto por la difracción. Una vez que la AO logró con éxito la compensación de la turbulencia atmosférica, otros problemas ganaron importancia, siendo el más importante el problema de las vibraciones del sistema óptico inducidas por diversos factores muchas veces difíciles de determinar. Estas vibraciones estructurales están presentes mayoritariamente en las aberraciones tip-tilt, lo que reduce la precisión en la adquisición de imágenes. Por lo tanto , se hace necesario tomar acciones de control.

Con este objetivo se desarrolla una demostración de laboratorio de un sistema para la compensación de los modos tip-tilt usando control en lazo cerrado, induciendo vibración al sistema utilizando un motor excéntrico de frecuencia controlable. Se mide la posición del Laser usando una cámara CMOS, mientras que la acción de control es realizada por un espejo Fast Steering Mirror (FSM).

Palabras Clave:

Óptica adaptativa, control en lazo cerrado, fast steering mirror, aberración tip-tilt.

INTRODUCCIÓN

La luz, al propagarse por medios turbulentos, sufre aberraciones que distorsionan su frente de onda. Estas distorsiones resultan perjudiciales para la astronomía [4], que busca alcanzar cada vez más resolución en sus imágenes adquiridas. Es crítico compensar estas aberraciones en tiempo real, para así restaurar la calidad de la imagen y alcanzar la resolución teórica establecida por el tamaño del telescopio (límite de difracción). La óptica adaptativa (AO) [1], [2], [3] viene a solucionar este problema. Esta técnica consiste, a modo grueso, en medir las distorsiones de los frentes de onda mediante sensores de frente de onda (WFS) y compensar esta aberración cambiando el camino de la luz usando espejos deformables (DM). Debido al excelente desempeño que han alcanzado los sistemas de AO, otras fuentes de distorsión han sido identificadas, entre ellas, las vibraciones mecánicas inducidas por la instrumentación asociada a cada telescopio, o incluso por el viento presente en los sitios de observación que mueve la estructura del telescopio. En poco tiempo más se acerca la construcción de grandes telescopios, como el EELT, el cual dado su tamaño y gracias a la óptica adaptativa, alcanzará resoluciones nunca antes vistas. Con tales resoluciones el problema de las vibraciones se hace más crítico y es necesario desarrollar soluciones para mitigar los efectos que estas producen sobre la calidad de las imágenes adquiridas.

Se han realizado numerosos estudios que buscan medir, caracterizar y mitigar estas vibraciones para así ganar el siguiente paso en desempeño en los sistemas de AO. Todos estos estudios coinciden en que las vibraciones son y serán un problema creciente, especialmente con la llegada de telescopios de gran tamaño, por lo cual investigar acerca de métodos de diseño de instrumentos, control de vibraciones, compensación de aberraciones ópticas inducidas por vibraciones son temas vigentes y de frontera. Se revisarán algunos de estos estudios en secciones posteriores. Luego, se establece como objetivo para esta tesis el realizar una demostración de laboratorio como primer acercamiento a resolver el problema de las vibraciones en forma óptica, es decir, compensando la aberración en el frente de onda usando un instrumento óptico, el Fast Steering Mirror (FSM), para los modos que más se ven afectados por dichas vibraciones (modos tip y tilt).

1.1. Estado del arte

La calidad de las imágenes adquiridas por los telescopios depende directamente de la resolución de este así como también de los efectos distorsionadores que ejerce la atmósfera

sobre los frentes de onda de la luz adquirida. El buen desempeño que han tenido los sistemas de Óptica Adaptativa en la compensación de la turbulencia atmosférica a dejado al descubierto otros problemas que distorsionan los frentes de onda, como lo son las vibraciones mecánicas de los telescopios y/o sus instrumentos.

La medición y mitigación de estas vibraciones es un tema de investigación vigente. Diversos investigadores han concentrado sus esfuerzos en la medición y estimación de estas vibraciones rastreando las posibles causas y proponiendo medidas de mitigación. En [11] (2012) se presenta un análisis de datos de modos tip tilt registrados en sistemas de óptica adaptativa instalados en diferentes telescopios alrededor del mundo, como Gemini South, William Herschel Telescope, LBT, VLT, Subaru. También presenta soluciones mecánicas para mitigar estas vibraciones, quedando vibraciones residuales que de todas formas afectan el desempeño de los instrumentos. La presencia de estas vibraciones es variada, estando en altas frecuencias (cientos de Hertz) y en bajas frecuencias debido a perturbaciones causadas por el viento (del orden de los 10 Hz). Como conclusión se señala que las vibraciones aparecen principalmente en modos bajos (tip y tilt) con diferentes niveles de energía mezcladas con otro tipo de perturbaciones con origen en el viento que mueve el telescopio. Se propone de solución abordar el problema desde la perspectiva del control, es decir diseñar controladores basados en modelo para tip tilt en conjunto con la identificación basado en la información espectral.

En [15] se sintetizan controladores basados en el dominio de la frecuencia para reducir vibraciones en los modos tip tilt el sistema MCAO en Gemini South (GeMS). Concluye señalando que el desempeño de estos controladores es sensible a errores de modelado, no-linealidades o dinámicas en el lazo que no están siendo modeladas, como dinámicas del espejo deformable. Una alternativa para solucionar esto consiste en diseñar controladores que minimizen la varianza de los residuales de la fase, eliminando el proceso de identificación del sistema, siendo libre de errores de modelado obteniendo un espectro más balanceado con menor varianza.

Los instrumentos asociados a la observación astronómica muchas veces deben ser operados a temperaturas criogenicas. Esto se consigue actualmente utilizando enfriadores mecánicos, los cuales reducen los requerimientos operativos en comparación a los sistemas con nitrógeno pero inducen vibraciones que no son compatibles con los requerimientos de estabilidad de los grandes telescopios modernos. En [20] se describen diferentes maneras que el Observatorio Europeo Asutral (ESO) ha implementado para reducir estas vibraciones causadas por sus instrumentos infrarrojos. Todas ellas soluciones mecánicas activas como la mostrada en la Figura 1.1

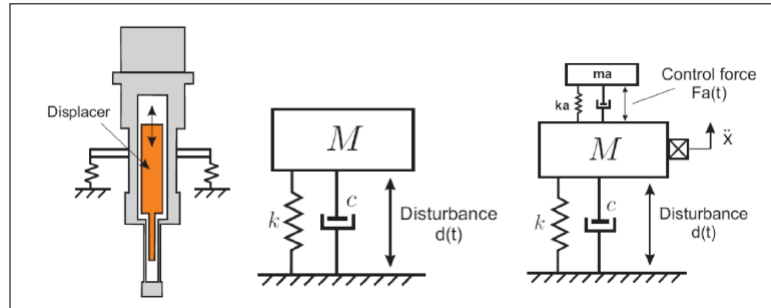


Figura 1.1: Enfriador y el modelo del enfriador. A la derecha se muestra el sistema de control

En el modelo de la Figura 1.1 fuerza de perturbación $d(t)$ (que causa las vibraciones) es compensada con la fuerza de control $F_a(t)$ mediante lazo cerrado donde la medición es realizada por un acelerómetro y la actuación es llevada a cabo por la corriente que pasa a través de una bobina.

Esta publicación concluye señalando que la mejor forma de evitar el problema de las vibraciones en sistemas ópticos es simplemente evitando generarlas en el ambiente que rodea al telescopio y los instrumentos. Sugiere que el sistema de enfriamiento usado en los telescopios debe ser aquel que garantice una mínima vibración.

De la misma forma, en [19] se detalla la medición de vibraciones que se llevó a cabo en el Gemini Planet Imager (GPI) mediante acelerómetros posicionados en el espejo primario del telescopio (por encima de la instrumentación del GPI). Se describe además los esfuerzos por mitigar estas vibraciones usando absorbentes ajustables de vibración (TVA, *Tunable vibration Absorbers*) y amortiguadores de masa, los cuales son una buena opción si las vibraciones son dominadas por una frecuencia única. en la Figura 1.2 se muestra un TVA posicionado sobre el sistema de enfriamiento del GPI. Se concluye señalando que el problema de las vibraciones es crítico y se hace necesario contar con la infraestructura de medición adecuada (acelerómetros) para entender y solucionar vibraciones indeseadas. En el caso del Observatorio Gemini se recomienda tener al menos 5 acelerómetros posicionados en el espejo primario (M1).

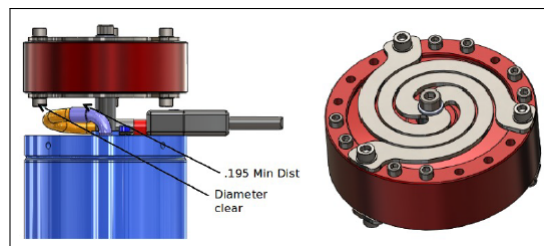


Figura 1.2: TVA montado sobre un enfriador criogenico del GPI

1.2. Identificación de problemas

En esta tesis se busca resolver el siguiente problema:

- Realizar una demostración de laboratorio como primer acercamiento a resolver el problema de las vibraciones en forma óptica, es decir, compensando la aberración en el frente de onda usando un instrumento óptico (y no mecánico) como lo es el Fast Steering Mirror (FSM) para los modos que más se ven afectados por dichas vibraciones (modos tip y tilt).

Parte del trabajo desarrollado en esta tesis ha dado origen a las publicaciones [21] [22].

1.3. Organización del documento

Este documento esta organizado en 5 capítulos (incluyendo este). El contenido de éstos se detalla a continuación:

Capítulo 1: Se presenta el contexto en el cual se desarrolla la tesis, estableciendo sus motivaciones y las soluciones abordadas por otros autores. Además se mencionan las contribuciones del trabajo y se da una descripción de cada capítulo de este documento.

Capítulo 2 En este capítulo se presenta una introducción acerca de los conceptos fundamentales en observación astronómica, Óptica adaptativa, así como también una revisión acerca del problema de las vibraciones, sus causas y efectos sobre la calidad de los datos adquiridos mediante telescopios.

Capítulo 3: Se presenta el setup experimental sugerido para la compensación de vibraciones en los modos tip tilt. Se revisan los componentes principales del setup de laboratorio, así como el lazo de control propuesto, explicando la medición y actuación necesarias para la mitigación de vibraciones.

Capítulo 4: Se muestran los resultados experimentales obtenidos y se discute el desempeño del sistema propuesto.

Capítulo 5: En este capítulo se presentan las principales conclusiones del trabajo y se discuten opciones para trabajo futuro y escalabilidad de la solución.

MARCO TEÓRICO

2.1. Introducción

La astronomía es posiblemente la ciencia más antigua de la humanidad. Actualmente se divide en los campos de Astronomía Teórica y Astronomía Observacional. La primera crea modelos teóricos utilizando análisis matemáticos y también simulaciones numéricas. Se estudian temas como formación y evolución de galaxias y estrellas, cosmología, composición y estructura de los cuerpos celestes, entre otros. Estos modelos teóricos requieren ser comprobados, y casi la totalidad de los procesos astrofísicos no pueden ser recreados en laboratorios terrestres, por lo cual se necesita realizar mediciones de los objetos celestes. La Astronomía Observacional se encarga de la adquisición, estudio y procesamiento de estos datos. Para realizar la adquisición se detecta la luz proveniente de los objetos a lo largo del espectro electromagnético, adquiriendo espectros y/o imágenes usando telescopios en la tierra y también en órbita. La calidad de las imágenes generadas en aquellos ubicados en la tierra está determinada por la resolución del telescopio y también por la atmósfera terrestre [4], que debido a su composición absorbe en parte o en su totalidad la radiación en algunas longitudes de onda [2]. Las fuentes de luz analizadas se encuentran muy lejos, por lo cual los frentes de onda son planos al entrar a la tierra. Sin embargo, la turbulencia en la atmósfera introduce cambios espaciales y temporales en el índice de refracción y en la longitud del camino óptico a lo largo de la línea de visión, lo que distorsiona los frentes de onda generando cambios en fase y amplitud [3]. Estas variaciones se originan mayormente en la troposfera que se extiende hasta los 15 [Km] de altura y contiene el 80 % de la masa de la atmósfera. Cambios en la temperatura producen gradientes de presión y vientos causando una mezcla de aire con diferente densidad e índice de refracción. La Óptica Adaptativa (AO) [1], [2], [3] intenta remover estas distorsiones en los frentes de onda usando componentes ópticos controlados por computador, lo que permite a los telescopios terrestres alcanzar el límite impuesto por la difracción.

2.2. Observación Astronómica

Los pioneros en astronomía que sentaron las bases de esta ciencia observaban a ojo desnudo. Con el paso del tiempo y el desarrollo de la tecnología se ha conseguido realizar observaciones con mucha más resolución que la permitida por el ojo humano usando telescopios ópticos. Debido a la característica ondulatoria de la luz, esta sufre difracción al

pasar por una apertura, lo que provoca un patrón de interferencia. Si la apertura es circular (como el espejo primario de la mayoría de los telescopios ópticos modernos) el patrón de interferencia forma un disco circular rodeado por una serie de anillos. El disco central se conoce como Disco de Airy y el radio de este depende del tamaño de la apertura y de la longitud de onda de la luz.

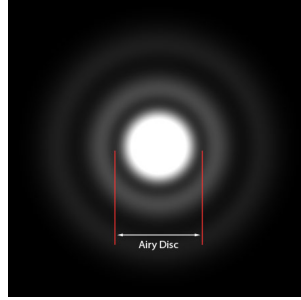


Figura 2.1: Ejemplo de patrón de difracción a través de una apertura circular. Al centro el Disco de Airy

Para telescopios de apertura circular, la resolución θ , presentada por Rayleigh, esta determinada por:

$$\sin(\theta) = 1.22 \frac{\lambda}{D} \quad (2.2.1)$$

Donde θ es la resolución angular (en radianes), λ es la longitud de onda de la luz y D es el diámetro del espejo primario del telescopio.

Como regla práctica se dice que dos objetos se pueden distinguir uno del otro si tienen una distancia angular que los separe de $\theta > \lambda/D$. La Ecuación 2.2.1 define la resolución ideal de un sistema óptico, es decir, cuando no existen aberraciones en el camino de la luz (frente de onda plano). En la práctica los sistemas ópticos aberran la luz desde su punto de entrada hasta el punto donde se encuentra la instrumentación de imagen o espectro. Debido a esto, se define la razón de Strehl S (Ecuación 2.2.2), que corresponde a la relación entre los peak de intensidad de una imagen de una fuente puntual para un sistema óptico con aberración (sistema real) versus un sistema óptico ideal sin aberración. Aquellos sistemas con razón de Strehl mayor a 0,8 se dice que son *limitados por difracción*.

$$S = \frac{\int OTF_{aberracion}(f_x, f_y) df_x df_y}{\int OTF_{sin.aberracion}(f_x, f_y) df_x df_y} \quad (2.2.2)$$

Siendo OTF la función de transferencia óptica.

La Figura 2.2 muestra un ejemplo de un sistema óptico cuya razón de Strehl corresponde a $S = 0.7$

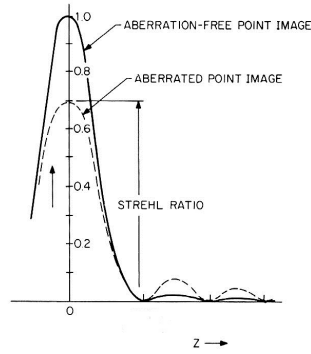


Figura 2.2: Ejemplo de Strehl Ratio $S = 0.7$

Los telescopios que se encuentran en órbita reciben la luz desde las fuentes en el espacio mediante frente de ondas planos debido a la gran distancia a la que se encuentran estas fuentes. Luego, estos telescopios ven limitada la calidad de las imágenes adquiridas sólo por su óptica asociada. En cambio, los telescopios terrestres ven limitada su resolución también por la turbulencia atmosférica que distorsiona los frentes de onda planos, debido a que la luz al pasar por la atmósfera enfrenta zonas con diferente temperatura y diferente índice de refracción que cambia la dirección de los rayos incidentes. Debido a esto es que se realizan extensos estudios en diferentes sitios antes de realizar la instalación de un telescopio. El parámetro más importante, y que define la calidad del cielo en cierta zona geográfica y en cierto momento es el *Seeing Atmosférico*, término que se refiere al efecto distorsionador que ejerce la atmósfera a los frentes de onda, medido en segundos de arco. Al igual que la resolución de un telescopio, el seeing depende de la longitud de onda de la luz y determina la resolución real con que se puede realizar observación astronómica. En teoría, un telescopio óptico con un espejo primario grande puede tener resoluciones con orden de magnitud cercano a los mili arcosegundos, la imagen real adquirida nunca tendrá mejor resolución que el *seeing* promedio durante ese tiempo de observación. La Figura 2.3 muestra el *seeing* medido durante más de 200 meses a partir de Enero de 1987 en los sitios de Paranal y La Silla. El seeing promedio para Paranal es de 0.91 arcsec y para La Silla es de 0.96 arcsec .

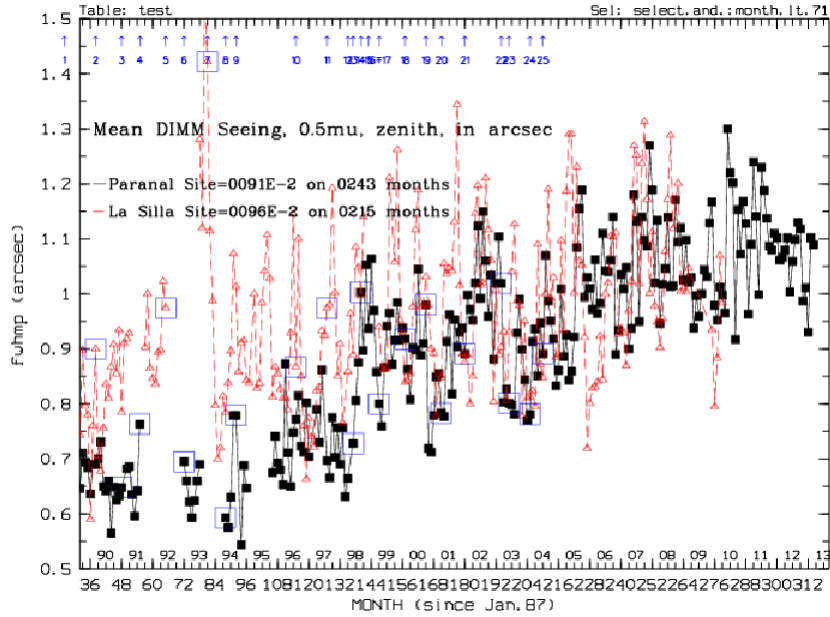


Figura 2.3: Estadísticas del seeing medido en Paranal (color negro) y La Silla (color rojo).

Debido a la limitante que impone la turbulencia atmosférica, es de interés medir la distorsión que esta pone sobre los frentes de onda, con el objetivo posterior de corregir estas aberraciones. Con este objetivo es que nació el concepto de la Óptica Adaptativa, tecnología que permite contrarrestar en tiempo real el efecto de la atmósfera en la formación de imágenes astronómicas. Este concepto se abordará con mas detalle en la sección 2.3.

2.2.1. Polinomios de Zernike

Es de interés poder medir, caracterizar y representar las aberraciones que posee un frente de onda. Un frente de onda, o superficie donde la fase de una onda es constante, es perfectamente plano cuando los rayos (desde el punto de vista de óptica geométrica) que componen la onda son perfectamente paralelos, como lo ilustra la Figura 2.4

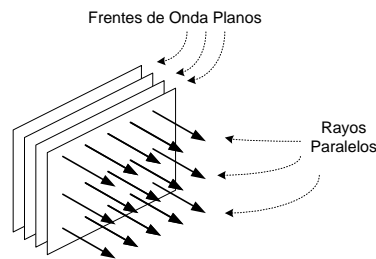


Figura 2.4: Frente de onda plano

Como lo indica la Ley de Snell, cuando la luz pasa entre medios con diferente índice de refracción, esta se desvía en cierto ángulo. Este concepto se aplica a los frentes de onda, cuyos rayos cambian de ángulo en forma diferente sobre la superficie del frente de onda, agregando aberraciones. Los *Polinomios de Zernike* [10] son una secuencia de polinomios ortogonales sobre un disco unitario utilizados para representar matemáticamente un frente de onda en sistemas ópticos.

Estos polinomios fueron derivados en primera instancia por *Fritz Zernike* en 1934, y son útiles para expresar frentes de onda puesto que estos polinomios tiene la misma forma que las aberraciones encontradas en óptica. Estos polinomios se expresan como multiplicación de otros dos polinomios, uno de ellos en función del radio ρ y el otro en función del ángulo θ . Existen polinomios pares e impares. Los polinomios pares están definidos por por:

$$Z_n^m(\rho, \theta) = R_n^m(\rho)\cos(m\theta) \quad (2.2.3)$$

mientras que los impares corresponden a:

$$Z_n^{-m}(\rho, \theta) = R_n^m(\rho)\sin(m\theta) \quad (2.2.4)$$

En tanto, el polinomio radial tiene la forma:

$$R_n^m(\rho) = \sum_{s=0}^{(n-m)/2} \frac{(-1)^s (n-s)!}{s! \left(\frac{n+m}{2} - s\right)! \left(\frac{n-m}{2} - s\right)!} \rho^{n-2s} \quad (2.2.5)$$

Se debe cumplir que $n \geq m$ ambos números enteros. La Figura 2.5 muestra gráficamente los polinomios zernikes hasta el séptimo orden.

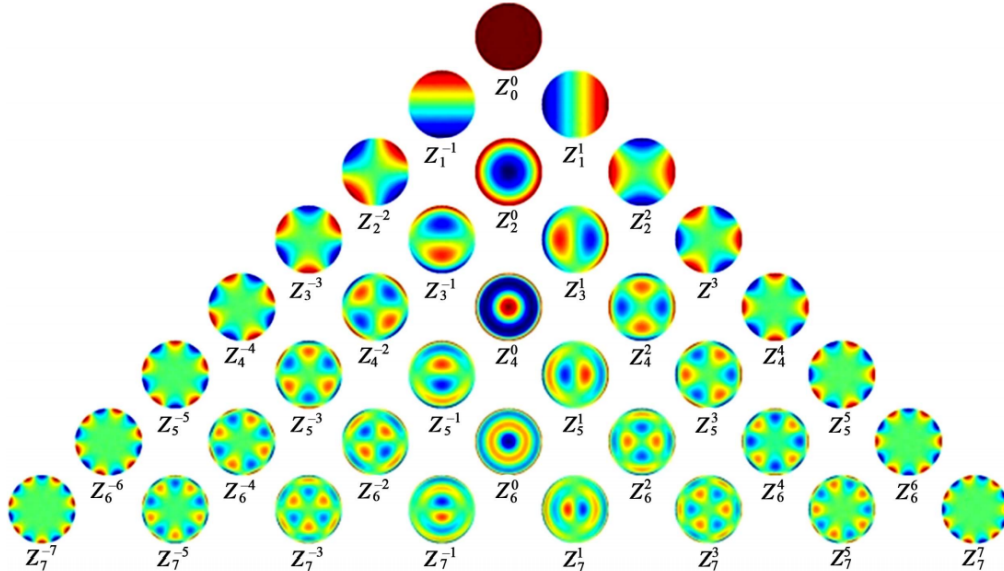


Figura 2.5: Ilustración piramidal de Polinomios de Zernikes hasta el séptimo orden. La notación contiene el coeficiente (Z), el orden (subíndice) y la frecuencia radial (superíndice)

En la Tabla 2.1 se muestran los polinomios, en función de ρ y θ hasta el cuarto orden:

Tabla 2.1: Algunos polinomios de Zernike

n	m	polinomio Z	nombre
0	0	1	Piston
1	1	$2\rho\cos(\theta)$	Tip
1	-1	$2\rho\sin(\theta)$	Tilt
2	0	$\sqrt{3}(2\rho^2 - 1)$	Defocus
2	2	$\sqrt{6}\rho^2\sin(2\theta)$	Astigmatismo oblicuo
2	-2	$\sqrt{6}\rho^2\cos(2\theta)$	Astigmatismo vertical
3	-1	$\sqrt{8}(3\rho^3 - 2\rho)\sin(\theta)$	Coma vertical
3	1	$\sqrt{8}(3\rho^3 - 2\rho)\cos(\theta)$	Coma horizontal
3	-3	$\sqrt{8}\rho^3\sin(3\theta)$	Trefoil vertical
3	3	$\sqrt{8}\rho^3\cos(3\theta)$	Trefoil oblicuo
4	0	$\sqrt{5}(6\rho^4 - 6\rho^2 + 1)$	Esferico primario
4	2	$\sqrt{10}(4\rho^4 - 3\rho^2)\cos(2\theta)$	Astigmatismo vertical secundario
4	-2	$\sqrt{10}(4\rho^4 - 3\rho^2)\sin(2\theta)$	Astigmatismo oblicuo secundario
4	4	$\sqrt{10}\rho^4\cos(4\theta)$	Cuadrafoil vertical
4	-4	$\sqrt{10}\rho^4\sin(4\theta)$	Cuadrafoil oblicuo

2.3. Óptica adaptativa

Como se ha explicado anteriormente, incluso en los mejores sitios para observación astronómica del mundo la turbulencia atmosférica distorsiona las imágenes obtenidas por los telescopios terrestres. Para solucionar este problema es que los astrónomos e ingenieros han desarrollado una técnica conocida como Óptica Adaptativa. Esta técnica requiere en primer lugar de la medición de deformaciones en los frentes de onda impuesta por la atmósfera. Para lograrlo se necesita de una fuente lo suficientemente brillante para ser usada como referencia de frente de onda. Estas fuentes no están siempre disponibles en forma natural (NGS: Natural Guide Star) en todas las partes del cielo, por lo que se utilizan fuentes creadas artificialmente usando Laser (LGS: Laser Guide Star) [5].

2.3.1. Laser Guide Star

Para la compensación de la turbulencia atmosférica los sistemas de óptica adaptativa necesitan información acerca de la distorsión que esta introduce sobre los frentes de onda. Esta información es obtenida mediante una fuente de luz cuyo frente de onda pasa a través de la atmósfera, y es medida con un sensor de frente de onda. En algunos casos objetos brillantes como estrellas proveen suficiente luz para servir de referencia, sin embargo, más frecuentemente se debe proveer esta referencia artificialmente. Las Estrellas Guías Laser (LGS) son estrellas artificialmente creadas mediante laser, el cual reacciona en la capa de

sodio de la atmósfera terrestre y genera una estrella que sirve como referencia de frente de onda. Esta estrella artificial puede ser situada donde quiera que el telescopio apunte, abriendo nuevas zonas del universo a la observación astronómica. La Figura 2.6 muestra el laser enviado hacia la atmósfera para la síntesis de la LGS para el Very Large Telescope (VLT) en Cerro Paranal, mientras que la Figura 2.10 muestra cuatro estrellas guías laser proyectadas sobre la atmósfera



Figura 2.6: Laser Guide Star

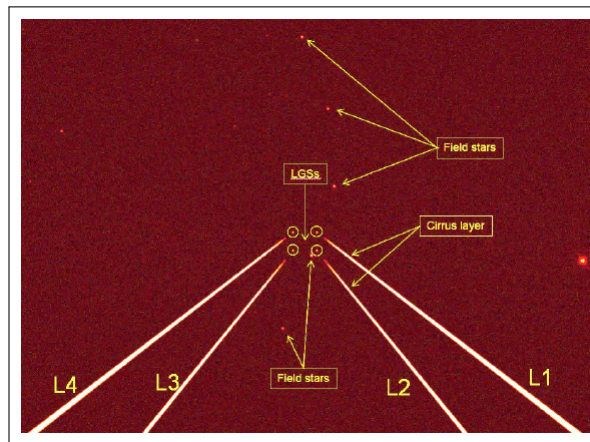


Figura 2.7: 4 Laser Guide Star (L1, L2, L3 y L4) en VLT UT4

2.3.2. Sensores de Frente de Onda

Teniendo la referencia, se debe medir la distorsión producida en esta. Para esto se requiere de un sensor de frente de ondas (WFS), siendo los sensores de frente de onda Shack-Hartmann (SHWFS) [6] [7] los más aceptados y utilizados. Estos operan bajo la lógica de dividir el haz de luz incidente en partes más pequeñas mediante un arreglo de microlentes [8]

que producen un arreglo de puntos (spots) en un detector. Se debe extraer la inclinación de la sección del haz en dos ejes (tip y tilt) respecto de la posición central. Esta inclinación se mide verificando la posición del centroide (donde esta concentrada toda la intensidad de esa sección del haz) de la luz luego de pasar por el lente pequeño. Estos desplazamientos son directamente proporcionales a la pendiente local del haz. La precisión de la medición del frente de onda depende de la buena medición de la posición de cada spot, y de la cantidad de microlentes en el arreglo. La Figura 2.8 ilustra el funcionamiento del SHWFS.

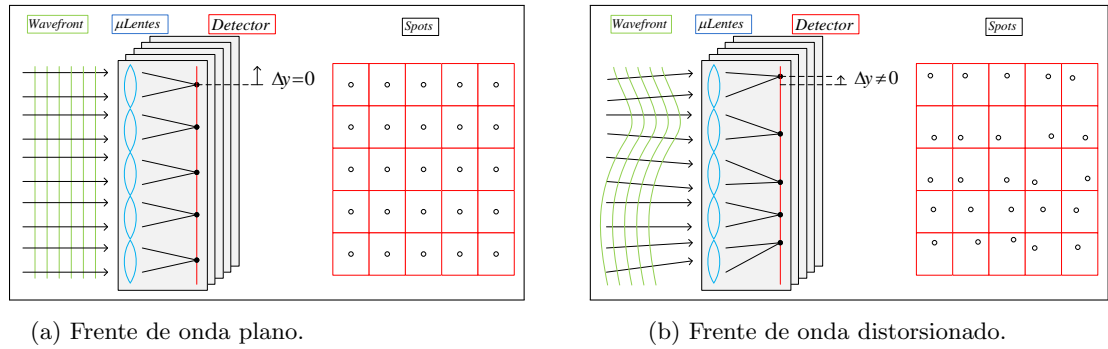


Figura 2.8: Funcionamiento del SHWFS: El haz es dividido en secciones más pequeñas y se mide la pendiente local de cada sección. Para el frente de onda plano, los spots se ubican en la posición central, en cambio para el frente de onda distorsionado, los spots se ubican de acuerdo a la inclinación, en dos ejes, del haz local.

Además del SHWFS existe el Pyramid Wave Front Sensor (PWFS), el cual funciona bajo el siguiente principio: La luz es enfocada en el vértice superior de una pirámide refractiva que divide el haz en cuatro partes que posteriormente inciden sobre un detector CCD para generar 4 imágenes conjugadas de la pupila. Luego, utilizando la intensidad de los pixeles equivalentes en cada imagen se realiza un cálculo que entrega información acerca del gradiente local en cada punto de la pupila.

$$S_x(x, y) = \frac{(I_2(x, y) + I_3(x, y)) - (I_1(x, y) + I_4(x, y))}{\sum_{i=1}^4 I_i(x, y)} \quad (2.3.1)$$

$$S_y(x, y) = \frac{(I_4(x, y) + I_3(x, y)) - (I_1(x, y) + I_2(x, y))}{\sum_{i=1}^4 I_i(x, y)} \quad (2.3.2)$$

En las Ecuaciones 2.3.1 y 2.3.2 $I_i(x, y)$ corresponde a la intensidad en el punto (x, y) en la i -ésima pupila en el CCD, numeradas de acuerdo a lo mostrado en la Figura 2.9

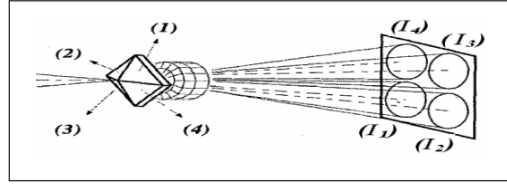


Figura 2.9: Funcionamiento del PWFS

Luego, las pendientes W de la fase del haz se relacionan con la medición mediante:

$$\frac{\partial W(x, y)}{\partial x} \propto S_x(x, y) \quad (2.3.3)$$

$$\frac{\partial W(x, y)}{\partial y} \propto S_y(x, y) \quad (2.3.4)$$

2.3.3. Espejos Deformables

Con la medición del frente de onda se está en condiciones de realizar la compensación de las aberraciones. Para esto se utilizan espejos deformables (DM) que toman la forma contraria a la distorsión medida, así al pasar la luz por el o los DM los frentes de onda quedan corregidos. Existen diversos tipos de DM [9], pero todos funcionan bajo el mismo principio: un conjunto de actuadores que controlados individualmente son desplazados para obtener la forma deseada. Los principales tipos de

Espejos deformables Bimorfos

Estos espejos están contruidos con dos materiales piezoeléctricos polarizados los cuales están unidos y en medio se ubica un arreglo de electrodos donde se aplica el voltaje de control. En la superficie exterior de cada material se ubica la referencia de voltaje 0 [V] (Tierra), entonces al aplicar un voltaje sobre un electrodo se genera un campo eléctrico localmente que produce una elongación transversal sobre una capa, mientras que la otra sufre una contracción, provocando una deformación local, cuya amplitud depende del voltaje que se haya aplicado.

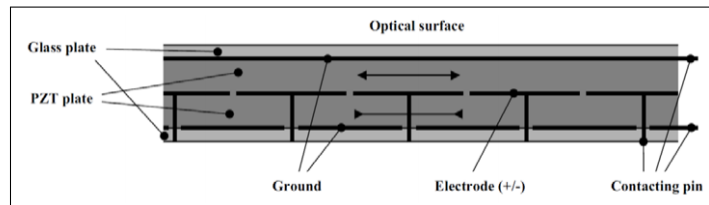


Figura 2.10: Espejo deformable bimorfo

MEMS

Están basados en la tecnología de Micro Electro-Mechanical Systems (MEMS) y operan bajo un principio parecido a los espejos piezoeléctricos. Poseen una membrana continua conectada a un diafragma cuyo radio de curvatura local es controlado mediante un campo electrostático generado por el voltaje en los electrodos.

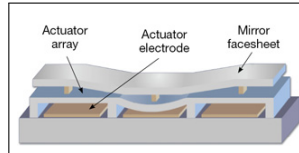


Figura 2.11: Espejo deformable MEMS

2.3.4. Lazo de Control de AO

De esta forma se puede construir el lazo estándar para AO (Figura 2.12), donde se corrige el frente de onda comandando el DM de acuerdo al control programado, y a la medición entregada por el WFS. El haz corregido es llevado finalmente hacia el detector donde se realiza la imagen de la luz capturada y corregida.

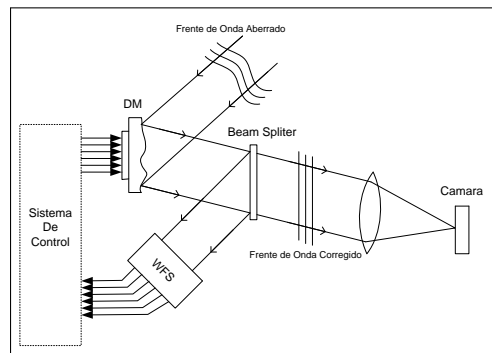


Figura 2.12: Sistema de Óptica Adaptativa.

La Figura 2.13 muestra una comparación de dos imágenes del planeta Neptuno adquiridas con y sin óptica adaptativa en el telescopio KECK.

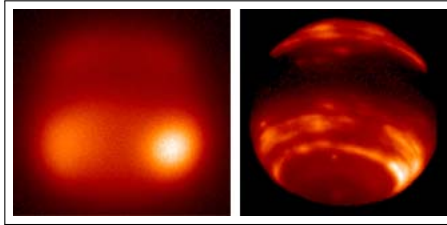


Figura 2.13: Comparación de la observación astronómica sin y con óptica adaptativa. Imagen de Neptuno

2.4. Vibraciones en Sistemas de AO

Los telescopios modernos y sus sistemas de óptica adaptativa están diseñados para entregar imágenes cerca del límite de difracción, por ejemplo el *gemini Planet Imager* permite alcanzar razones de Strehl cercanas de 0.9. Las perturbaciones que afectan la calidad de la imagen están compuestas por fenómenos que no son solamente inducidos por la atmósfera, y muchos de estos no son bien compensados por la óptica adaptativa. Estos fenómenos anexos a las perturbaciones atmosféricas incluyen vibraciones causadas por el viento u otras fuentes como shutters, ventiladores, sistemas de enfriamiento y motores, entre otras fuentes. Dichas perturbaciones a la imagen en forma de vibraciones pueden ser mitigadas diseñando y posicionando inteligentemente el sistema completo, pero aún así estas vibraciones persisten con diferentes niveles de energía, estando presentes y afectando la corrección de los frentes de onda principalmente en los modos de Zernike de bajo orden, especialmente tip y tilt.

Vibraciones en VLT

Por ejemplo en el VLT el instrumento NACO (NAOS+CONICA) [13] corrige imágenes en el infrarrojo cercano. Durante la puesta en funcionamiento de NAOS se observaron diversas frecuencias en las mediciones en los WFS. Luego de algunas pruebas se concluyó que el origen de estas vibraciones era el enfriador de CONICA (CCC, CONICA Cycle Cooler), teniendo mayor impacto en los modos Tip y Tilt con frecuencias de 16-18 Hz, 48-55 Hz, 68-70 Hz. Se llevaron a cabo estudios para identificar las fuentes de estas vibraciones utilizando acelerómetros, prendiendo y apagando diferentes subsistemas del telescopio. Se identificó al Hydrostatic Bearing System (HBS) como el responsable del aumento en las vibraciones del telescopio, en especial los modos de 18 Hz. En tanto los ventiladores resultaron ser los responsables de las vibraciones de 44 Hz. El CCC resulto ser responsable por las vibraciones de 14 Hz y 18 Hz.

También en el VLT opera el instrumento MACAO (Multiple Application Curvature Adaptive Optics System). El Interferómetro del VLT (VLTI) utiliza este sistema, y durante su primer año de operación se detectaron problemas en su desempeño, muchos de estos producto de las vibraciones en torno a los 50 Hz como se muestra en la Figura 2.14. Ver [11]

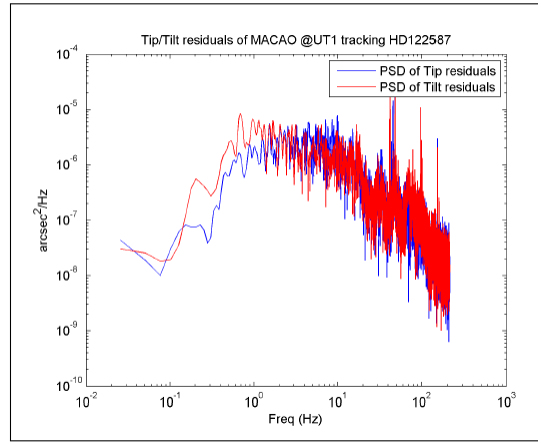


Figura 2.14: Densidad espectral de potencia de los modos tip tilt medidos en VLT MACAO. Muestreo a 420 Hz

Vibraciones en LBT

En el caso del Large Binocular Telescope LBT (<http://www.lbto.org/>) este posee un espejo secundario deformable (DSM) el cual presenta una frecuencia resonante cercana a $\sim 13\text{Hz}$. El seguimiento del telescopio y el viento pueden excitar esta frecuencia generando fluctuaciones en la imagen del orden de los ~ 26 milisegundos de arco rms, como se muestra en la Figura 2.15

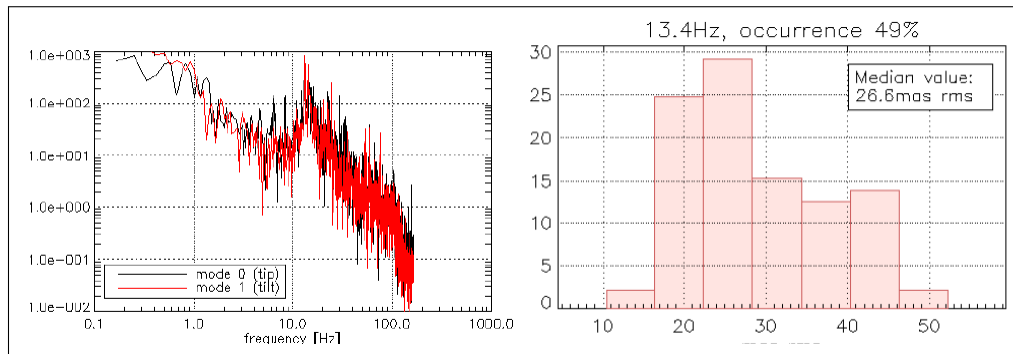


Figura 2.15: Vibraciones sobre el espejo secundario

Se aprecia claramente una fuerte vibración cercano a $\sim 13\text{Hz}$ en los modos tip y tilt. Esta vibración reduce el ratio ed Strehl desde 0.8 hasta incluso 0.4.

Vibraciones en Gemini South

En el observatorio Gemini South (<http://www.gemini.edu/>) existe un sistema de óptica adaptativa multiconjugado (GeMS, Gemini multi-conjugate AO, MACAO) el cual utiliza 5 LGS y 3 NGSs con sus WFSs asociados. El banco que contiene el sistema de AO está montado sobre el foco Cassegrain del telescopio y en un esfuerzo por reducir el efecto de las vibraciones, los gabinetes que contienen la electrónica están mecánicamente desacoplados del banco que sostiene el sistema de AO. Sin embargo, los instrumentos están montados sobre la misma plataforma (Instrument Support Structure: ISS). Se identificó que los enfriadores criogénicos del instrumento GSAOI (cámara con su sistema de AO en el infrarrojo cercano) inducen vibración en los 55 Hz con una magnitud de 5 a 10 *mas rms* disminuyendo el ratio de Strehl en 10%. También se detectó un peak de vibración en los 14 Hz que se cree es generado por el viento, debido a que este peak no está siempre presente.

También en Gemini South existe el Gemini Planet Imager [18], instrumento que posee un sistema extremo de óptica adaptativa (XAO) dedicado a la detección de exoplanetas, por lo tanto es muy susceptible a vibraciones. Se ha medido una vibración presente cercano a los 60 Hz [19]. Se instalaron sensores en el espejo secundario del telescopio, y si bien se detectó vibración en esta frecuencia, su magnitud no fue suficiente para explicar el error observado en los frentes de onda. Debido a esto es que adicionalmente se instalaron 3 acelerómetros en el espejo primario del telescopio, los cuales presentaron las siguientes mediciones mostradas en la Figura 2.16

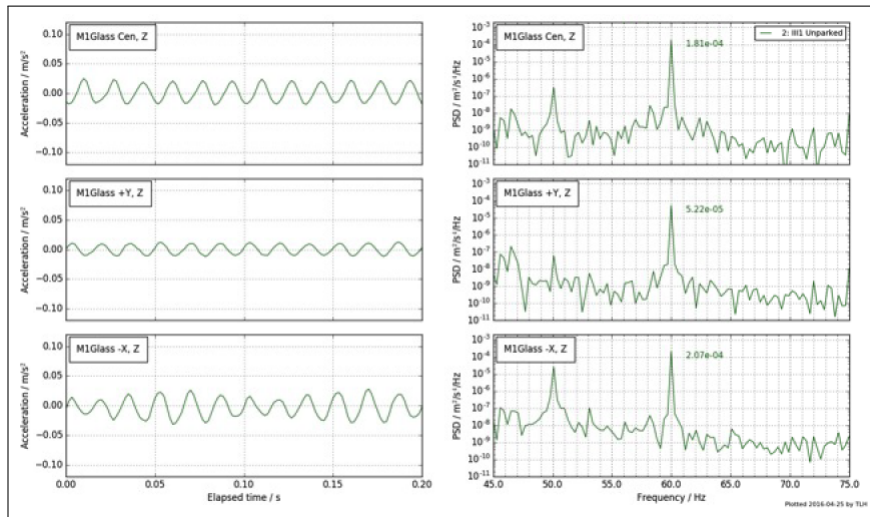


Figura 2.16: Aceleración medida sobre el espejo primario con GPI montado

Debido al problema que provocan las vibraciones, Gemini llevó a cabo un programa de 4 años para la caracterización de estas vibraciones el cual concluyó que la fuente de vibraciones más significativa son los enfriadores criogénicos de los instrumentos. Se sospecha que luego de eliminar las vibraciones asociadas a estos enfriadores ganarán más importancia aquellas

asociadas a ventiladores y bombas. También se identificaron dos mecanismos que influyen en la calidad de la imagen por medio de estas vibraciones: acoplamiento directo entre los sistemas de AO y las fuentes de vibración, y acoplamiento a la óptica del telescopio, en cuyo caso se ve afectada toda la ciencia asociada a los instrumentos.

La AO ha demostrado ser una técnica bastante sólida para compensar el efecto que tiene la turbulencia atmosférica sobre las imágenes generadas en los telescopios. A medida que la AO mejora en la compensación de estas turbulencias, otros factores como las vibraciones en los instrumentos y el telescopio comienzan a ganar importancia. Resolver este problema es el siguiente paso para ganar una mejora de desempeño en estos sistemas.

SETUP EXPERIMENTAL

3.1. Introducción

En el desarrollo de este capítulo, se presenta un setup experimental diseñado para la compensación de vibraciones, explicando cada uno de sus componentes fundamentales de hardware y de software

3.2. Descripción del setup experimental

El setup experimental desarrollado se muestra en la Figura 3.1.

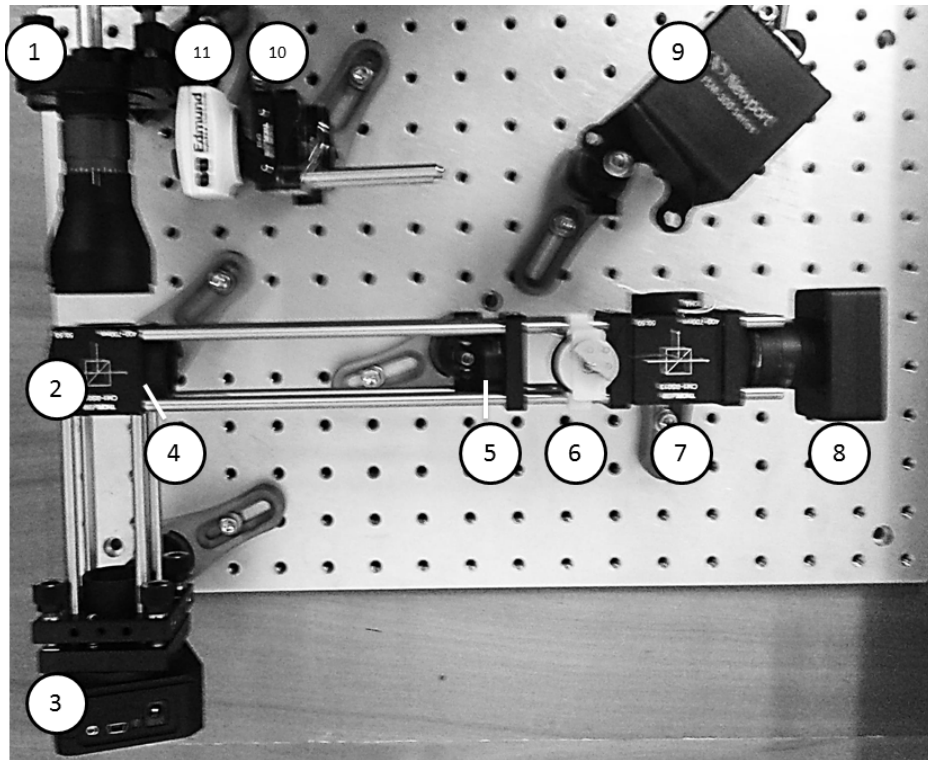


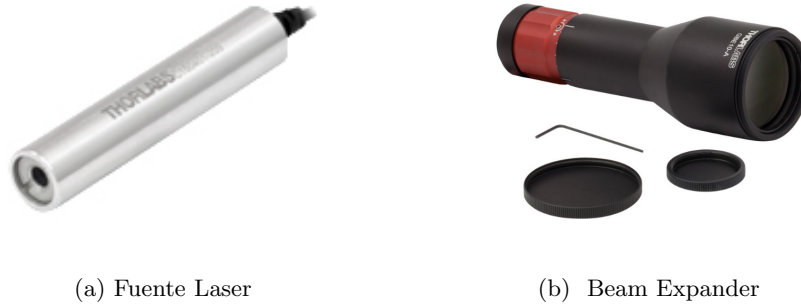
Figura 3.1: Setup Experimental. (1): Fuente Laser y Beam Expander, (2): Beam Splitter 1, (3): Espejo Deformable, (4): Lente 1, (5): Lente 2, (6): Fuente de Vibración, (7): Beam Splitter 2, (8): Sensor de Frente de Onda, (9): Fast Steering Mirror, (10): Lente 3, (11): Camara CMOS

En este setup, la fuente laser envia un haz de luz rojo (635[nm]) hacia el expansor de haz, que permite cambiar el tamaño del haz de luz enviado hacia el resto del sistema. Luego el haz atraviesa el primer beam splitter para incidir sobre el espejo deformable DMP40 que envia posteriormente el haz hacia este mismo beam splitter, que a su vez desvía el haz hacia el primer lente del sistema. Posteriormente, luego del segundo lente, el haz pasa por un segundo beam splitter para hacer llegar el haz hacia el sensor de frente de onda WFS20 y al Fast Steering Mirror. Luego de incidir sobre el FSM el haz llega al tercer lente del sistema, el cual focaliza el haz sobre la camara E0-0413C, usada para medir el desplazamiento del haz respecto de una coordenada de referencia sobre el arreglo de pixeles.

3.2.1. Fuente Laser y Beam Expander

La fuente laser (Figura 3.2a) consiste en un haz de luz coherente fabricado de longitud de onda 635 [nm] típica, 1.2 [mW] de potencia en un diametro de 2.9 [mm] (CPS635R código Throlabs). El expansor de haz permite cambiar el diámetro del haz que es enviado al resto del sistema. Consiste en un expansor de haz de tipo galileano para longitudes de onda

entre 400[nm] y 650[nm] pudiendo llegar hasta 3X de expansion (GBE03-A código Thorlabs, Figura 3.2b).



(a) Fuente Laser

(b) Beam Expander

3.2.2. Beam Splitter

El beam splitter consiste en un dispositivo diseñado para dividir la luz en 2 o más partes. Todos los beam splitters utilizados en el sistema dividen el haz en dos partes repartiendo la intensidad 50:50 (haz reflejado y haz transmitido) entre ambas partes. Son de forma cúbica y operan bajo longitudes de onda ente 400[nm] y 700[nm]

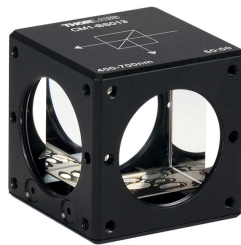


Figura 3.3: Beam Splitter CM1-BS013

3.2.3. Espejo Deformable

El setup experimental también cuenta con un espejo deformable (DM). Son espejos diseñados para que su superficie pueda ser deformada y poder conseguir frentes de onda junto con su control y corrección. El espejo utilizado corresponde al DMP40 de Thorlabs (Figura 3.5b), el cual consiste en un disco piezoeléctrico con electrodos segmentados, y pegado a un sustrato de vidrio sobre el cual tiene la superficie reflectante, tal como se muestra en la Figura 3.4

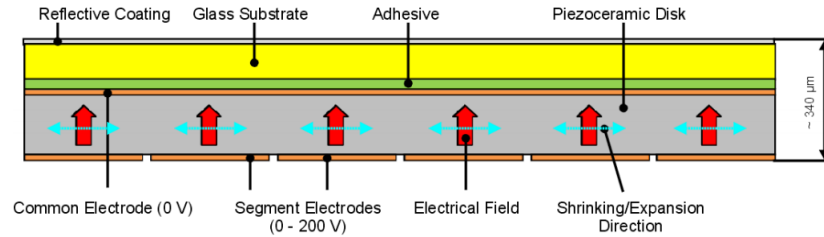
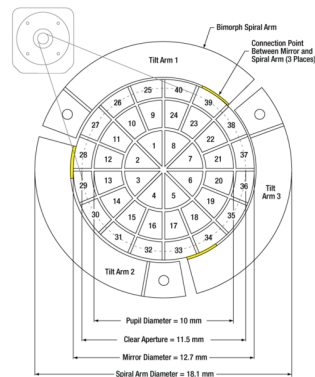


Figura 3.4: Sección transversal de la estructura interna del espejo DMP40

Cada segmento (Figura 3.5a) puede ser controlado individualmente para conseguir formas cóncavas o convexas, de acuerdo al voltaje aplicado a cada electrodo (entre 0[V] y 200[V]). Durante la fabricación del espejo, en el proceso de pegado entre el material piezoeléctrico y el sustrato de vidrio, se somete a un voltaje de 100[V] a cada electrodo, por lo cual la forma plana del espejo deformable se obtiene dejando todos los segmentos en 100[V]. Voltajes menores a este causan que el material piezoeléctrico se expanda lateralmente, obteniendo una forma cóncava en el segmento correspondiente. De la misma forma, voltajes mayores a 100[V] causarían que el segmento se encoja produciendo una forma convexa en el segmento.



(a) Estructura interna del Espejo Deformable



(b) Espejo deformable DMP40

En el desarrollo de esta investigación el DM se dejará con una forma plana, es decir 100[V] en cada segmento, con el fin de reflejar el haz sin cambiar su frente de onda. La corrección del frente de onda será realizada por el Fast Steering Mirror (FSM) en los modos de Tip y Tilt.

3.2.4. Lentes

El sistema posee tres lentes biconvexas, el primero de ellos (lente 1) sujeto al primer beam splitter. Este lente recibe el haz colimado proveniente del DM y lo hace converger en su punto focal ubicado a 7.5[mm]. Un lente del mismo tipo (lente 2) es puesto a 7.5[mm] del punto

focal del lente 1, por lo tanto luego del lente 2 se obtiene nuevamente el haz colimado. Esta técnica es utilizada para tener diferentes puntos de imagen en distintas partes del sistema. Un tercer lente (Lente 3) es utilizado para focalizar sobre la cámara al haz proveniente desde el FSM.

3.2.5. Fuente de Vibración

Entre el lente 2 y el beam splitter 2 se encuentra la fuente de vibración, mostrada en la Figura 3.6, encargada de generar vibraciones que desvíen el haz de su posición natural, es decir, generando modos tip and tilt. Con este objetivo se elige un motor excéntrico con carga desbalanceada, cuya frecuencia de giro depende del ciclo de trabajo del voltaje PWM entre sus terminales. Para generar el voltaje que controla la fuente de vibración se utiliza un dispositivo Arduino UNO, en cuyos puertos de salida análoga se pueden producir voltajes PWM con ciclo de trabajo ente 0 y 100 %

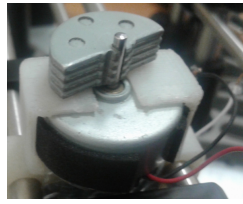


Figura 3.6: Fuente de vibración

3.2.6. Sensor de Frente de Onda

El sistema cuenta con un sensor de frente de onda WFS20-5C de Throlabs (Figura 3.7), el cual corresponde a un sensor del tipo Shack Hartmann que consiste en una cámara con un arreglo de microlentes dispuesto en frente. La cámara del sensor es de tipo CMOS de apertura 7.20[mm] x 5.40[mm] con una resolución de 1440 x 1080 pixeles. Cada pixel tiene un tamaño de 5[μm] \times 5[μm]. El arreglo de microlentes corresponde al MLA150M-5C de Throlabs con una cantidad de 47x35 microlentes.

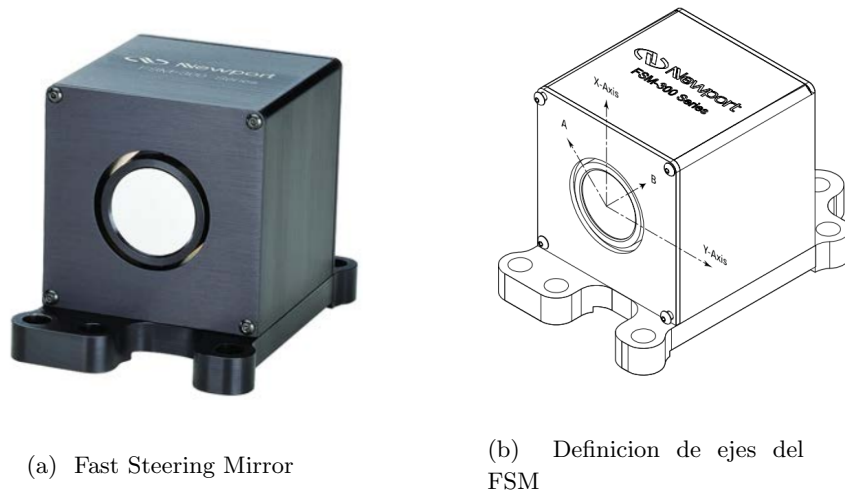


Figura 3.7: Sensor de Frente de Onda WFS20-5C/M

Este sensor de frente de onda en conjunto con el espejo deformable permite controlar frente de onda cerrando el lazo via software proporcionado por el fabricante. Para esta investigación el sensor WFS20 no será utilizado para cerrar el lazo de compensación de modos tip & tilt. En su lugar se utilizará la cámara EO-0413C, que en conjunto con el espejo FSM (actuador) conformarán el lazo propuesto.

3.2.7. Fast Steering Mirror

El Fast Steering Mirror (Figura 3.8a) es el dispositivo encargado de realizar la acción de control, moviendo en dos ejes el haz incidente en el ángulo deseado. Corresponde al espejo FSM-300 de Newport.



Este espejo cuenta con dos ejes de movimiento con un rango angular de ± 26.2 [mrad] (con ± 10 [V]) y una resolución menor a 1 [μ rad]. Esta fabricado de vidrio de borosilicato de ancho 6 [mm] y 25.4 [mm] de diámetro. El material reflectante corresponde a Aluminio y funciona sobre longitudes de onda de entre 450 [nm] y 700 [nm].

Para controlar este espejo se utiliza su controlador FSM-CD300B (Figura 3.9)



Figura 3.9: Xontrolador FSM-CD300B

La conexión eléctrica entre el espejo y su controlador es realizada mediante el conector de 15 pines (conector etiquetado como "FSM" en la Figura 3.9), mientras que el conector de 25 pines (etiquetado como "INTERFACE I/O" en la figura 3.9) provee acceso a los parámetros de control y diagnóstico del espejo. Los voltajes de control para dirigir el espejo a determinada posición angular son entregados hacia el controlador FSM-CD300B via los conectores BNC etiquetados como "Comand Inputs" o también los pines respectivos en el conector de 25 pines.

Para enviar hacia el controlador del espejo los voltajes diferenciales requeridos para conseguir su movimiento se utiliza la tarjeta de adquisición de datos USB-1208HS-4AO de Measurement Computing (Figura 3.10). Posee 4 salidas análogas de ± 10 [V] (coincidente con el rango del FSM) con 12 bits de resolución. Esta tarjeta se conecta al computador de control vía puerto USB.



Figura 3.10: 1208HS-4AO

3.2.8. Cámara CMOS

La cámara es el elemento encargado de la medición de la desviación del haz respecto de un punto de referencia. La cámara esta puesta en el foco del lente 3, por lo tanto el haz llega idealmente enfocado hacia el detector, concentrando toda su potencia en un punto. La cámara utilizada corresponde a la EO-0413C de Edmund Optics (Figura 3.11), una cámara CMOS a color de 752x480 pixels, con un tamaño de pixel de 6×6 [μm]. Mide la intensidad con 8 bits de resolución (0 a 255) y puede alcanzar una tasa de 87 frames por segundo.



Figura 3.11: Camara CMOS Edmund Optics 0413C Lite Edition

Esta cámara se conecta al computador de control via puerto USB

3.3. Control propuesto

Se propone el siguiente esquema de control para la compensación de tip (es equivalente para tilt). En este esquema el tip de referencia cuando el sistema se encuentra alineado y sin ser excitado por la fuente de vibración.

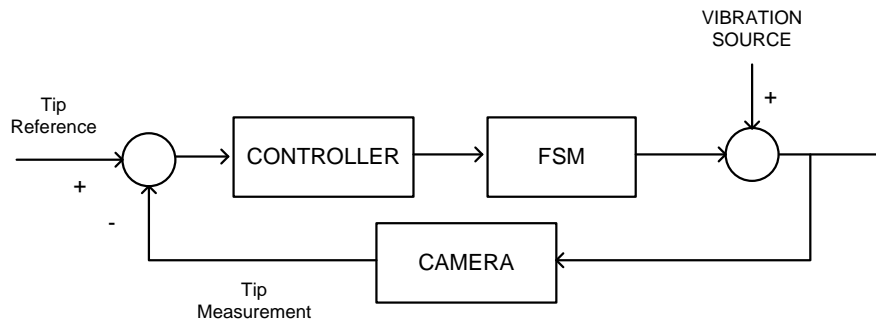


Figura 3.12: Esquema de Control

Una vez medida la posición de equilibrio del haz se procede a excitar el sistema con una vibración conocida. Esto es realizado por la fuente de vibración, la cual es controlada mediante el ancho de pulso del voltaje en sus terminales. En cada iteración se lee el arreglo de pixeles completo, se calcula la posición del haz y luego su error. Posteriormente se determina el voltaje a enviar hacia el controlador del FSM, siendo este transmitido por la tarjeta de adquisición.

La medición es llevada a cabo por la cámara, mientras que el FSM es el encargado de realizar la acción de control, cambiando la inclinación del haz en dos ejes, compensando la inclinación inducida por la perturbación (fuente de vibración).

3.3.1. Medición y compensación de modos Tip & Tilt

La medición de la inclinación del haz es realizada por la cámara EO-0413C. Se determina la posición del haz en el arreglo de pixeles en cada iteración del loop de control y se compara con la medición realizada cuando el sistema no esta siendo perturbado por la fuente de vibración, lo que permite calcular el error en la posición del haz en dos ejes (X e Y, o tip and tilt). Este error puede expresarse en cantidad de pixeles, unidad de distancia (μm) o ángulo (radianes). La relación entre estas tres unidades es lineal. Un pixel equivale a $6 [\mu\text{m}]$ debido al tamaño del pixel (igual en ambos ejes). También puede expresarse en unidades de ángulo considerando la distancia entre la cámara y el FSM recordando que $\Theta \approx d/D$ siendo Θ la inclinación del haz (en radianes), d la desviación del haz en unidades de distancia y D la distancia entre el FSM y la cámara en unidades de distancia.

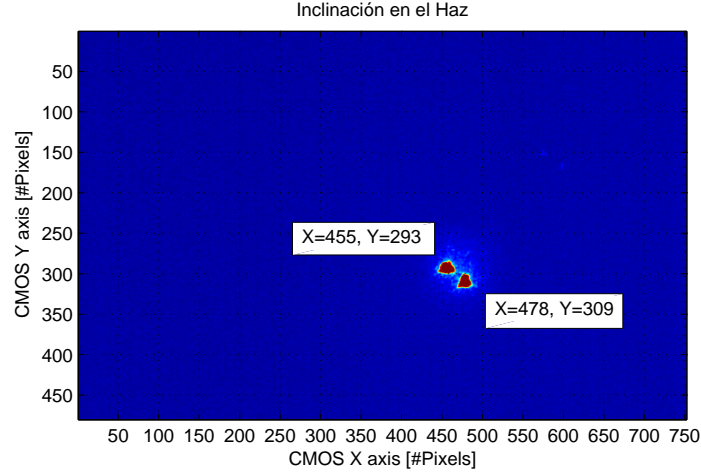


Figura 3.13: Ejemplo de desviación en el Haz

La Figura 3.13 ilustra el efecto sobre la posición del haz cuando se induce tip y tilt sobre este. Se muestra el haz focalizado en dos momentos diferentes, un primer instante en que no existe vibración (por lo tanto está en su posición original, es decir, sin tip y tilt), y un instante posterior en que se ha inclinado el haz en sus dos ejes.

Para determinar la correcta posición del laser sobre el detector CMOS se debe calcular el centroide del spot en cada iteración del loop. Calcular el centroide de todo el detector puede llevar a imprecisiones en la estimación de la posición del haz, debido a que las cuentas de fotones no son cero donde no incide el haz, es decir, aun existen fotones sobre el CMOS que provienen de otra fuente, como la luz ambiente.

El centroide se calcula como se muestra en las Ecuaciones 3.3.1 y 3.3.2

$$X_{cm} = \frac{\sum_{i=1}^N m_i x_i}{\sum_{i=1}^N m_i} \quad (3.3.1)$$

$$Y_{cm} = \frac{\sum_{j=1}^M m_j y_j}{\sum_{j=1}^M m_j} \quad (3.3.2)$$

Donde X_{cm} e Y_{cm} son las coordenadas del centroide sobre los ejes X e Y respectivamente. N y M corresponden al número de pixeles $N \times M$ de la cámara (752x480 en este caso). m_i y m_j son la cuenta de fotones de cada pixel (ente 0 y 255) leídos sobre el eje X e Y respectivamente. Este cálculo implica leer todos los pixeles de la cámara y luego computar la operación de las Ecuaciones 3.3.1 y 3.3.2, lo cual puede llevar algunos milisegundos. Con el objetivo de reducir el tiempo que toma realizar esta operación, esta se ha simplificado de tal forma que las cuentas de fotones m_i y m_j son consideradas 1 cuando su valor está sobre 200 y 0 en caso contrario. De esta forma se midió una reducción en el tiempo de computo, pasando desde

$300[\mu s]$ a $80[\mu s]$ (programando el control en Matlab). El punto más crítico y que determina la velocidad del loop es el tiempo que toma hacer la lectura de la cámara. Se midió que este evento toma cerca de $30[ms]$, dejando la velocidad del loop en aproximadamente $30[Hz]$. Por supuesto que este tiempo puede ser mejorado utilizando una cámara con mayor frame rate. La siguiente Figura muestra el desempeño temporal del loop.

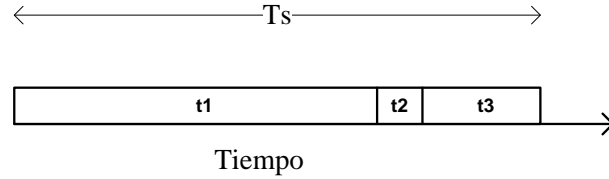


Figura 3.14: Tiempos de loop

En la Figura 3.14 se han medido los tiempos $t_1 = 30[ms]$ correspondiente al tiempo que toma la lectura y transferencia de los datos de cada pixel del detector CMOS hacia el computador de control, $t_2 = 80[\mu s]$ correspondiente al tiempo que toma el cálculo de las coordenadas del centroide sobre el arreglo de pixeles y $t_3 = 0.57[ms]$ el tiempo que toma transmitir el voltaje (calculado por el controlador) desde la tarjeta de adquisición hacia el controlador del espejo FSM. Estos tiempos, sumados al tiempo de calculo de la actuación por parte del controlador, fijan $T_s \approx 32[ms]$, correspondiente al tiempo que toma una iteración del loop, es decir, una frecuencia de aproximadamente $31[Hz]$. Esto pone una cota superior a las frecuencias que pueden ser compensadas por el sistema, siendo esta cota igual a $15[Hz]$.

Otro factor importante es el voltaje enviado hacia el controlador del FSM. Este se envía mediante la tarjeta de adquisición 1208HS-4AO, que posee una resolución de 12 bits sobre $\pm 10[V]$. Esto implica que puede enviar voltajes con resolución de $10/2^{11}[V]$ (tamaño del paso). Esto establece un tamaño del paso para el ángulo que puede producir el FSM (debido a que este posee una resolución mucho mayor, la cota está establecida por la resolución de voltaje de la tarjeta adquisidora). El rango de movimiento del FSM corresponde a $\pm 26.2[mrad]$ comandados con $\pm 10[V]$ en los terminales de entrada de su controlador (FSM-CD300B), por lo tanto la resolución de ángulo que puede alcanzar el FSM debido a la resolución de la tarjeta adquisidora corresponde a $26.2[mrad]/2^{11} = 12.79[\mu rad] = 2.64[arcseconds]$.

RESULTADOS

En este capítulo se muestran resultados experimentales del control ejecutado por el sistema, cuando este está siendo perturbado por vibración. El lazo de control está programado en Matlab y su diagrama de flujo se muestra en la Figura 4.1.

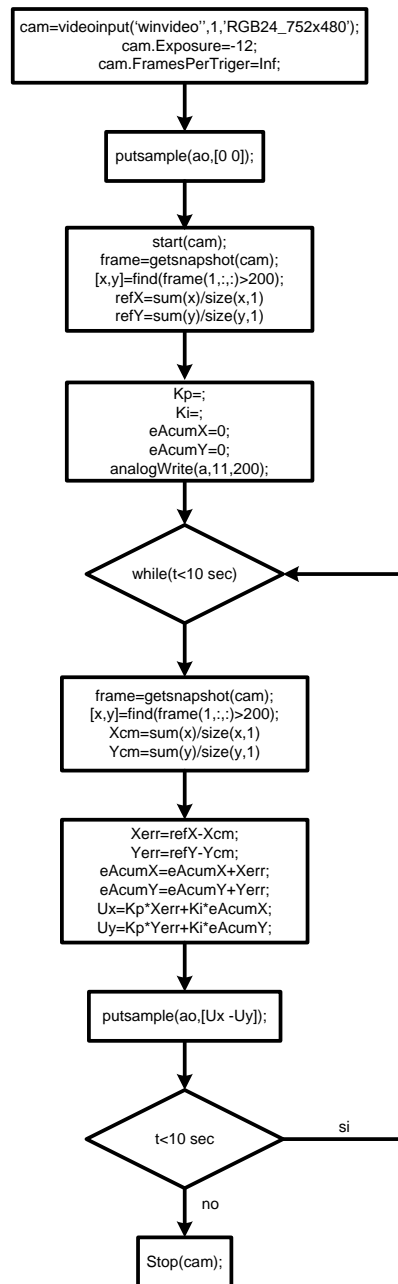


Figura 4.1: Lazo de control programado en matlab

En primer lugar, para comenzar un experimento se debe definir el objeto que adquirirá imágenes, es decir, la cámara CMOS. Para esto se utiliza el toolbox de adquisición de imágenes *imaqtool* que con su comando *videoinput* permite crear un objeto de entrada

de video. Adicionalmente se pueden definir otros parámetros de interés, como el modo de disparo y la cantidad de frames por disparo. Posterior a esto se definen las salidas análogas de la tarjeta de adquisición que serán las encargadas de enviar los voltajes hacia las dos entradas del controlador del espejo FSM. Estas salidas análogas o *analog output (ao)* son definidas mediante el *Data Acquisition Toolbox* (con soporte para Measurement Computing) y su comando *analogoutput* en conjunto con *addchannel*. Adicionalmente se debe definir el objeto *Arduino* para poder comandar el dispositivo Arduino UNO que será usado para enviar la señal PWM hacia la fuente de vibración.

Con estas definiciones hechas se puede realizar la medición, así como comandar la acción de control y perturbar el sistema con vibraciones. Mediante el comando *putsample(ao,[0 0])* se manda un voltaje de 0[v] a ambos ejes del controlador del espejo FSM, con el objetivo de poner al espejo FSM en aquella posición en que no posee tip y tilt. Luego, sin agregar vibraciones al sistema, y sólo con control proporcional en ambos ejes, se comienza la adquisición de la cámara mediante el comando *start(cam)*. La ganancia K del controlador se aumenta sucesivamente hasta detectar la ganancia crítica K_c con la cual el lazo llega al límite de estabilidad. Conociendo la ganancia crítica K_c y el período de la oscilación originada en la salida, T_c , los parámetros del controlador PID de la Ecuación 4.0.1 se calculan de acuerdo a lo especificado en la tabla 4.1.

$$u(t) = K \cdot \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (4.0.1)$$

Tabla 4.1: Sintonización Ziegler-Nichols, método de la oscilación.

Control	K	T_i	T_d
P	$0.5K_c$	-	-
PI	$0.45K_c$	$T_c/1.2$	-
PID	$0.6K_c$	$0.5T_c$	$T_c/8$

Este método de sintonización se conoce como *Método de Ziegler-Nichols*.

De esta forma se detecta que con una ganancia de $K_c = 0.045$ se llega al límite de estabilidad, generando una oscilación en el lazo de período $T_c \approx 0.096[s]$. por lo tanto, el controlador PI a utilizar corresponde a:

$$u(t) = 0.02025 \cdot \left(e(t) + \frac{1}{0.08} \int_0^t e(\tau) d\tau \right) \quad (4.0.2)$$

Posteriormente, sin control, sin vibración y sin inclinación en el FSM se realiza la lectura de un frame (comando *getsnapshot(cam)*) al cual se le calcula el centroide para así determinar las inclinaciones de referencia en los ejes X e Y.

El siguiente paso consta de perturbar el sistema con vibración con el objetivo de probar el

control propuesto.

4.1. resultados

Se generaron vibración con la fuente de vibración en una frecuencia de 8.5[Hz]. La Figura 4.2 muestra la densidad espectral de potencia de la vibración generada, medida por la cámara CMOS, en ausencia de control, y con el FSM en su posición de origen (0 [rads] en ambos ejes).

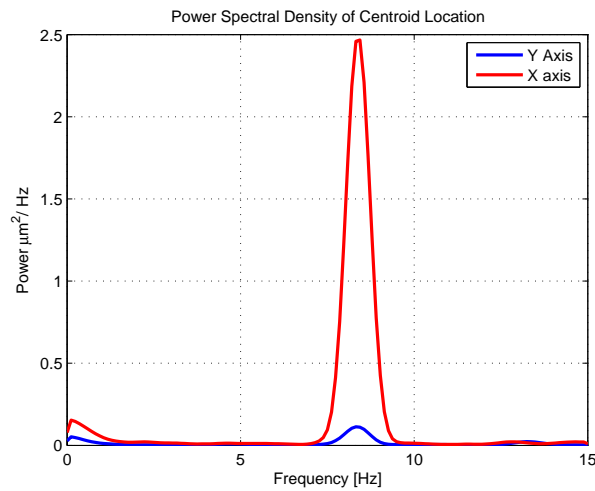


Figura 4.2: Densidad espectral de potencia de la posición del sin control en ambos ejes

Se observa que la potencia está concentrada cerca de los 8.5 [Hz], y la medición tiene un límite máximo en frecuencia de 15 [Hz] debido al tiempo de cada iteración del lazo, correspondiente a aproximadamente 30 veces por segundo, acotado mayormente por la lectura de la cámara. Existen diferencias entre el eje X y el eje Y debido a la construcción física de la fuente de vibración, la cual gira su carga alineada con el eje X de la cámara, por lo cual se aprecia más potencia de vibración en el eje X que en el eje Y.

La potencia de la vibración fue medida en ambos ejes. En el eje X esta presenta una potencia de $2.16[\mu m^2]$ en los 8.5 [Hz] y una potencia total de $2.42[\mu m^2]$, en tanto en el eje Y la vibración en torno a los 8.5 [Hz] posee una potencia de $0.11[\mu m^2]$ y una potencia total de $0.21[\mu m^2]$.

Ahora se prueba el sistema utilizando el control PI, sometiendo al sistema bajo la misma vibración. El resultado se muestra en la Figura 4.3.

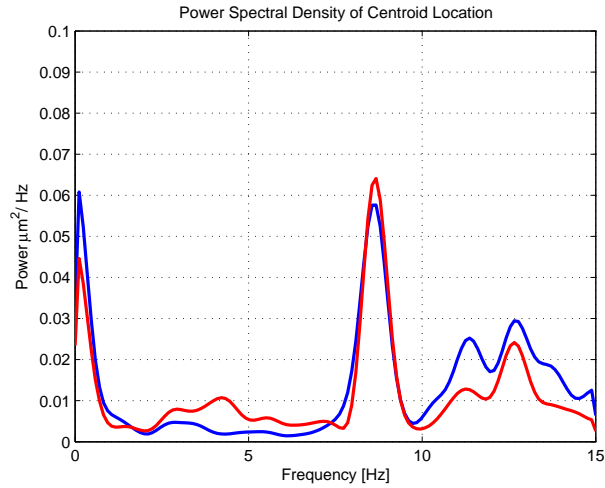
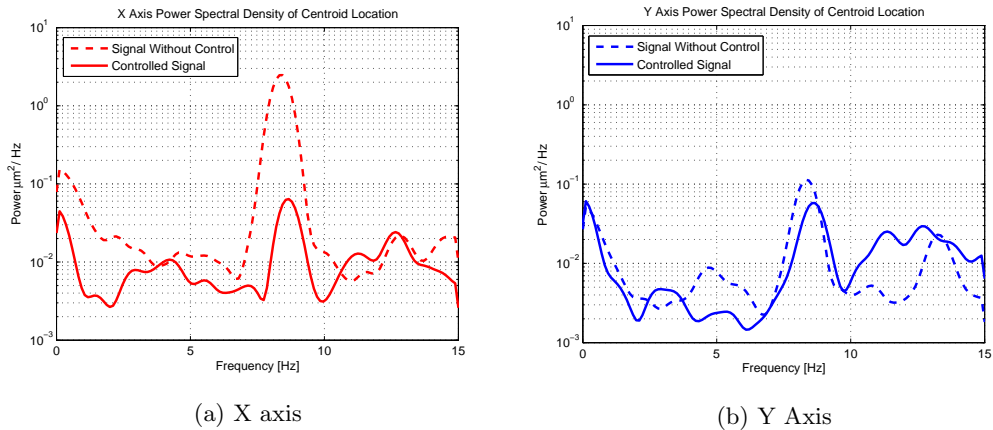


Figura 4.3: Densidad Espectral de Potencia del movimiento del centroide con control en ambos ejes

Sin control, la potencia de la vibración en torno a los $8.5[\text{Hz}]$ es de $0.11[\mu\text{m}]^2$ para el eje Y y $2.16[\mu\text{m}]^2$ para el eje X. Con control, esto fue reducido a $0.06[\mu\text{m}]^2$ y $0.0565[\mu\text{m}]^2$ para cada eje, respectivamente. De la misma manera, la potencia total fue reducida desde $2.42[\mu\text{m}^2]$ hasta $0.19[\mu\text{m}^2]$ en el eje X y desde $0.21[\mu\text{m}^2]$ hasta $0.17[\mu\text{m}^2]$ para el eje Y. Estos resultados se resumen en la Figura 4.4 y en la Tabla 4.2



(a) X axis

(b) Y Axis

Figura 4.4: Desempeño del lazo de control

Tabla 4.2: Resumen

	Sistema sin control	Sistema con control PI
Potencia [μm^2] a los 8.5[Hz], eje X	2.16	0.06
Potencia [μm^2] a los 8.5[Hz], eje Y	0.11	0.06
Potencia total [μm^2], eje X	2.42	0.19
Potencia total [μm^2], eje Y	0.21	0.17

CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

5.1. Conclusiones

Esta investigación se desarrollo en el contexto de los sistemas de óptica adaptativa para el mejoramiento de la calidad de las imágenes adquiridas por los telescopios modernos, específicamente para la mitigación de perturbaciones en modos tip tilt con origen en vibraciones mecánicas sobre los telescopios o instrumentos asociados. Se propuso mitigar el efecto de estas vibraciones utilizando un espejo dedicado exclusivamente para la compensación de tip tilt.

El setup experimental propuesto muestra uno de los primeros acercamientos hacia la compensación de vibraciones en tip y tilt de forma óptica, es decir, utilizando algún componente óptico como lo es el espejo FSM y no métodos mecánicos para la atenuación. En las pruebas de laboratorio se comprobó el correcto funcionamiento del lazo para los rangos de frecuencias permitidos principalmente por el hardware, con énfasis en la cámara la cual acota el ancho de banda del lazo debido a su velocidad de adquisición (frames per second). Luego, se proponen las siguientes ideas como trabajo futuro.

5.2. Trabajo futuro

El trabajo realizado en esta tesis dio origen a nuevas ideas y mejoras que no han podido ser cubiertas, a continuación se presentan las ideas principales:

- Usar una cámara de mayor velocidad con el fin de aumentar el ancho de banda del lazo. Se sugiere también ocupar sensores de posición de haz, como los *Quadrant Sensor* y los *sensores de efecto lateral*. Los primeros pueden alcanzar 150 Khz de ancho de banda y los segundos llegando a 15 KHz de ancho de banda. Esto aumentaría considerablemente la velocidad con que se realiza la medición y la velocidad del lazo quedaría acotada por la velocidad de respuesta del actuador, es decir, es espejo FSM.
- De la misma manera se propone usar un espejo tip tilt que tenga integrada la conexión con el PC de control de manera de trabajar a máxima resolución angular y así poder

compensar vibraciones en ordenes de miliarcosegundos, lo cual es más cercano a la realidad de las vibraciones medidas en diversos telescopios.

- Se propone también integrar el lazo de compensación y medición de vibraciones con el resto del lazo de óptica adaptativa, es decir, usar el WFS y el DM compensando simultáneamente vibraciones y turbulencia atmosférica.
- Se sugiere medir vibraciones con acelerómetros y cerrar el lazo de control con esta medición y el FSM. Los acelerómetros miden a mayor velocidad que la cámara utilizada y esto permitiría realizar el control con más rapidez estimando la posición del haz y su inclinación a partir de las mediciones de aceleración.
- Como manera de mejorar el setup de laboratorio y probar el control en más rangos de frecuencia se propone utilizar una fuente de vibraciones que permita generar dichas vibraciones en un rango mayor del espectro y de forma más adaptable utilizando, por ejemplo, *Shakers electrodinámicos* que permiten generar vibraciones desde 0 Hz hasta 100 Hz o llegando incluso a ordenes de los KHz.
- Probar métodos avanzados de control como LQG y H_2 y establecer comparaciones con métodos clásicos de control

Apéndice A

APÉNDICE

Código para Iniciar mccDaq

```
1  clc
2  daqhardwareinfo=daqwinfo;
3  daqinstalledadaptors=daqhardwareinfo.InstalledAdaptors;
4  daqregister('mcc');
5  daqinstalledadaptors;
6  daqmccinfo = daqwinfo('mcc');
7  daqmccinfo.ObjectConstructorName{:};
8  %%
9  clear
10 clc
11 ai = analoginput('mcc',0);
12 ai;
13 ao = analogoutput('mcc',0);
14 ao;
15
16
17 addchannel(ai,0:1,{ 'ai0', 'ai1' });%addchannel(ai,0:3,{ 'ai0', 'ai1', 'ai2', 'ai3' })
18 addchannel(ao,0:1,{ 'ao0', 'ao1' });%addchannel(ao,0:1,{ 'ao0', 'ao1' })
19 daqwinfo(ai);
20 daqwinfo(ao);
21 rateAo=propinfo(ao,'SampleRate');
22 rateAi=propinfo(ai,'SampleRate');
23 set(ao,'SampleRate',5000)%for AO, maxRate = 10000, one of two in use
24 set(ai,'SampleRate',25000)%for AI, maxRate = 50000, one of four in use
25 %set(ao,'TriggerType','Manual');
26 ActualRateAo=get(ao,'SampleRate');
27 duration=4; %seconds
28 maxlength=ActualRateAo*duration ;
29 freq=4; %Hz
30 %ao0Data=sin(linspace(0,2*pi*freq*duration,maxlength)); %volts range [0 4.096]
31 %ao1Data=1; %volts range [0 4.056]
32 %putdata(ao,[1+ao0Data 1+ao1Data])
33 %plot(1+ao0Data)
34
35 %start(ai)
36
37 %trigger(ao)
38 N=500;
39 sampleValue=-2;
40 for i=1:N
41 tic;
42 sampleSent(i)=sampleValue;
43 putsample(ao,[sampleValue sampleValue]);
44 t_putsample(i)=toc;
45 sampleValue=4.096/N+sampleValue;
46 tic;
47 sampleRec(i,:)=getsample(ai);
48 t_getsample(i)=toc;
49 end
50
51 tic
52 putsample(ao,[0 0]);
53 toc
54 figure
55 subplot(3,1,1)
56 plot(sampleSent)
57 title('Samples Sent')
58 ylabel('Voltaje [V]')
59
60 grid on
61 hold on
```

```

62 subplot(3,1,2)
63 plot(sampleRec)
64 title('Samples Rec')
65 ylabel('Voltaje [V]')
66
67 grid on
68 hold on
69 subplot(3,1,3)
70 plot(t_putsample+t_getsample, 'r')
71 hold on
72 plot(t_getsample)
73 hold on
74 plot(t_putsample, 'k')
75 title('Tiempos')
76 ylabel('Tiempo[s]')
77 xlabel('Muestra[#]')
78 legend('Suma', 'get Sample', 'put Sample');
79 grid on
80 figure
81 plot(sampleSent, sampleRec);
82 xlabel('Sample Sent [V]');
83 ylabel('Sample Rec [V]');
84 grid on
85
86 sprintf('Periodo y frecuencia es %2d Segundos, %2d Hertz', mean(t_putsample+t_getsample), 1/mean(
    t_putsample+t_getsample))
87
88
89 % [data, time] = getdata(ai, 1000);
90
91 %wait(ao, 5)
92 %%
93
94
95 figure
96
97 plot(t_getsample)
98 hold on
99 plot(t_putsample, 'k')
100 title('Tiempos')
101 ylabel('Tiempo[s]')
102 xlabel('Muestra[#]')
103 legend('get Sample', 'put Sample');
104 grid on
105 %plot(time, data)
106 stop(ai)

```

Código para Controlar FSM

```

1 clear C centX centY angleY angleX frame M errX errY ux uy x y sampleRec;clc
2 %a=arduino('com5')
3 cam=videoinput('winvideo',1,'RGB24_752x480');
4
5 src = getselectedsource(cam);
6 src.Exposure = -12;
7 cam.ROIposition = [391 264 55 57];
8 cam.ReturnedColorspace = 'grayscale';
9 cam.FramesPerTrigger = Inf;
10
11 triggerconfig(cam, 'manual');
12 start(cam);
13
14 pause(1); % Wait for the camera to adjust the AGC
15 tempAcum=0;
16 i=1;
17 putsample(ao,[0 0]);
18 analogWrite(a,11,0) %omienzo
19 offsetX=-0.1782;
20 offsetY=0.2466;
21 sampleX=0;
22 sampleY=0;
23 prevSampleX=0;
24 prevSampleY=0;
25 pause(1)
26
27 frame = (getsnapshot(cam));
28 %C= centerOfMass(frame);
29 [x,y]=find(frame(:,:,1)>200);
30 Xcm=sum(x)/size(x,1);
31 Ycm=sum(y)/size(y,1);
32
33 originX=Xcm;
34 originY=Ycm;

```

```

35
36 Kp=1.7*0.0135 %1.5x funciona bien
37 Ki=1.7*0.0135/12.5 %1.5x funciona bien
38 putsample(ao,[0 0]);
39 analogWrite(a,11,200) %vibracion
40 pause(2)
41 timeStart=clock;
42 currentTime=clock;
43 errAcumX=0;
44 errAcumY=0;
45 tic
46 while (currentTime(6)-timeStart(6))<5
47     currentTime=clock;
48     %tic
49     frame = (getsnapshot(cam));
50     %getsnaphottime=toc
51     %tic
52     %C= centerOfMass(frame);
53
54     [x,y]=find(frame(:,:,1)>200);
55     Xcm=sum(x)/size(x,1);
56     Ycm=sum(y)/size(y,1);
57     %centroidetime=toc
58     centX(i)=Xcm;
59     centY(i)=Ycm;
60     Xerr=originX-Xcm;
61     Yerr=originY-Ycm;
62     errX(i)=Xerr;
63     errY(i)=Yerr;
64
65     errAcumX=errAcumX+errX(i);
66     errAcumY=errAcumY+errY(i);
67     sampleY=Kp*Yerr+Ki*errAcumY;
68     sampleX=Kp*Xerr+Ki*errAcumX;
69     %f(Xerr>0) sampleX=-0.1;else sampleX=0.1; end
70     %f(Yerr>0) sampleY=-0.1;else sampleY=0.1; end
71     ux(i)=sampleX;
72     uy(i)=sampleY;
73
74     putsample(ao,[sampleX -sampleY]);
75
76     sampleRec(i,:)=getsample(ai);
77     i=i+1;
78 end
79 endtime=toc
80 analogWrite(a,11,0)
81 putsample(ao,[0 0]);
82 putsample(ao,[0 0]);
83 stop(cam);
84 %%
85 figure
86 plot(errX,'r');
87 hold on
88 plot(errY,'k')
89 title('error')
90 %%
91 figure
92 plot(ux,'r');
93 hold on
94 plot(uy,'k')
95 title('actuacion')
96 %%
97 figure
98 plot(centX,'r-');
99 hold on
100 plot(centY,'k-')
101 title('Centroid Location')
102 xlabel('Frame')
103 ylabel('Pixel Number')
104 %%
105 L=size(centX,2); %DATA size
106 dt=endtime; %0 seconds (windowTime)
107 Fs=L/dt % sample rate = 1/10000
108
109 %Periodogram for each window for each axis (in your case; 2 axis T&T)
110 X.mags = (abs(fft(centX(1,:)-mean(centX(1,:)))/L)).^2; %X axis acceleration FFT (without
111     accelerometer offset voltage)
112 Y.mags = (abs(fft(centY(1,:)-mean(centY(1,:)))/L)).^2; %dem for Y axis
113     %dem for Z axis
114
115
116 %Buffer filling, newest data added at left side
117
118
119 %:::::PSD frequency axis setup:::::
120 bin_vals = [0 : L-1];

```

```
121 fax_Hz = bin_vals*Fs/L;
122 N_2 = ceil(L/2);
123 %: ::::::::::::::::::::::::::::::::::::
124
125 %PSD estimation (arbitrary units)
126 %PSD (#Nwindows latets windows average)
127
128
129 figure %plotting
130 plot(fax_Hz(1:N_2),(X_mags(1:N_2)));xlim([0 20]);title('mean FFT') ; hold on
131 plot(fax_Hz(1:N_2),(Y_mags(1:N_2)), 'r');xlim([0 20]);title('mean FFT') ;
132
133 figure; plot(sampleRec(:,1));hold on;plot(ux, 'r');title('sampilRec y ux')
134 figure; plot(sampleRec(:,2));hold on;plot(uy, 'r');title('sampleRec y uy')
135 s=tf('s');
136 H=Kp*(1+1/(Ki*s))
137 figure; bode(H)
138
139
140 %%
```

Closed-loop control for tip-tilt compensation on systems under vibration

Mario Castro^{a*}, Pedro Escárate^a, Javier Garcés^a, Sebastián Zúñiga^a, Diego Rojas^a, José Marchioni^a, Andrés Guesalaga^b

^aAC3E, Departamento de Electrónica, Universidad Técnica Federico Santa María, Avenida España 1680, Valparaíso, Chile

^bPontificia Universidad Católica de Chile, 4860 Vicuña Mackenna, Santiago, Chile

ABSTRACT

Mechanical vibrations affect the performance in modern adaptive optics systems. These structural vibrations induce aberration mainly in tip-tilt modes that reduce the accuracy of the astronomical instrument. Therefore, control actions need to be taken. With this purpose we present a laboratory demonstration of vibration rejection of tip-tilt modes using closed-loop control, inducing vibration on the test bench via an eccentric motor with controllable frequency, in order to simulate the structural vibrations mentioned above. We measure the laser vibration and its tip-tilt aberration using a camera and a Shack Hartmann Wave Front Sensor. The control action is carried out by a Fast Steering Mirror (FSM).

Keywords: Adaptive Optics, Vibrations in AO control, Tip and Tilt, Fast Steering Mirror

1. INTRODUCTION

Adaptive optics (AO) is a technology that allows the operation of modern astronomical instruments with high accuracy, mitigating wavefront distortions by reducing the deleterious effects produced by the Earth's atmosphere. This technology has been successfully implemented in almost all modern telescopes. AO has demonstrated to be good mitigating atmospheric distortion, therefore, other sources of aberration have become important, such as mechanical vibrations. This structural vibration can be caused by motors, fans, tracking errors or wind shaking the structure. There have been measurements of vibration in several telescopes, in order to identify and reduce these aberrations. For example, the MACAO system at GEMINI SOUTH presents tip-tilt vibration produced by cryo-coolers.¹

Various researchers have concentrated on the design of sophisticated control methods for mitigate the vibration using spectral analysis over wavefront sensor measurements of the lower aberration modes, determining frequencies and amplitude of these vibrations. These advanced control methods consists basically in the minimization of a criterion function like LQG control or Predictive Control and Kalman, H-2 and H-infinity optimal control. They demonstrate an improvement in vibration rejection compared with classical control methods^{5,6,7}.

In this research we show a laboratory demonstration of vibration rejection of tip-tilt modes using closed-loop control, inducing vibration on the test bench via an eccentric motor with controllable frequency, in order to simulate the structural vibrations mentioned above. We measure the laser vibration and its tip-tilt aberration by checking the spot position when the laser impinges on a camera.⁹ The control action is carried out by a Fast Steering Mirror (FSM)⁸ controlled by a Data Acquisition System (DAC).¹⁰ Finally, we conclude discussing the technological limitations and possible improvements of the demonstration.

(*) Corresponding author: mario.castror@alumnos.usm.cl

2. CLOSED LOOP AND SYSTEM PROPOSED

We propose the control loop for tip compensation as shown in Fig 1 (this is equivalent for tilt control). In this scheme the reference tip is determined when the system is not been excited by any vibration, i.e. the system is perfectly aligned. The measurement is performed by a CMOS camera and the tip and tilt modes are estimated via a centroid calculation of the incident beam. The Fast Steering Mirror (FSM) perform the control action, changing the inclination in two axes of the beam, compensating the tip and tilt perturbations induced by the vibration source.

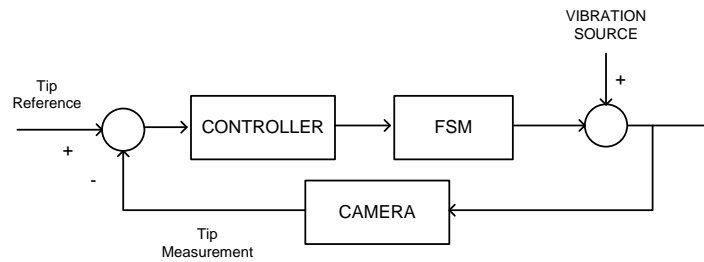


Figure 1: Closed loop scheme

The Test bench used for tip and tilt compensation is shown in Fig 2.

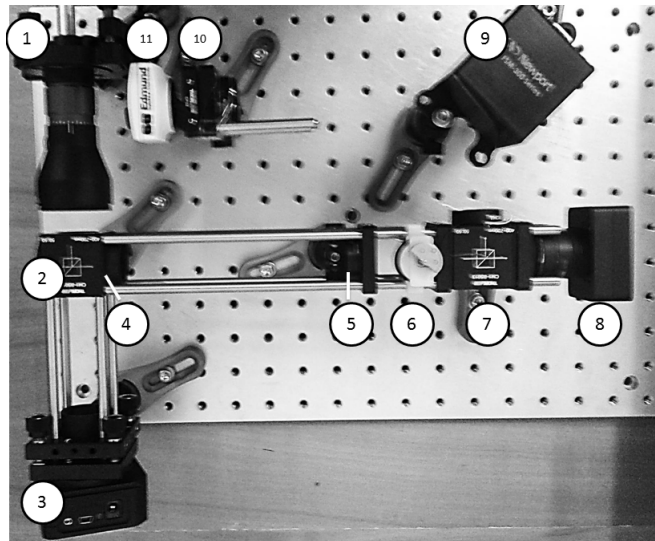


Figure 2: System proposed for tip & tilt mitigation. (1): Laser source (650[nm]) and Beam Collimator, (2)(7): Beamsplitter, (3): deformable Mirror, (4)(5)(10): Lenses, (6): Vibration Source, (8): Shack-Hartmann Wave Front Sensor, (9): Fast Steering Mirror, (11): CMOS Camera.

In this system the laser passes through the relay optics and the Fast Steering Mirror before arriving the detector. The relay optics is excited by a known vibration. This vibration changes the light path of the laser

and, therefore, changes the detector measurements. the DM is holded flat, so the tip and tilt compensation is carried out only by the Fast Steering Mirror (FSM). The FSM used is the Newport's FSM- 300 and it is controlled by the FSM-CD300B driver. This FSM provides two axis rotation with high bandwidth and angular resolution. The rotation angle is determined by the voltage applied in the respective axis terminal at the driver. The vibration source consists in a vibrating PWM motor with a non-symmetric load. The velocity, i.e. the vibration frequency, is controlled by the pulse width of the voltage in its terminals. This motor is placed over the relay optics.

The FSM is controlled by its own controller/driver, the FSM-CD300B. This controller receive two voltages in two terminals corresponding to the desired angle for each axis. In this implementation we are sending this voltages using a Data Acquisition Card Measurement Computing USB-1208HS-4AO. Because of the resolution of the DAC there is a minimum angle step that can be generated by the actuator, the Fast Steering Mirror. The resolution of the DAC is 12 bits over $\pm 10[V]$, that is $4.9[mV]$ of resolution. Also, the FSM has an angular range of $\pm 26.2[mrad]$ (mechanical) from $\pm 10[V]$. So, the angle step that can be set by the DAC, FSM300 Controller and the FSM is $26.2[mrad]/2^{11} = 12.79[\mu rad]$ or $2.64[arcseconds]$.

In the same way, there are timing consideratios. The laser position is measured with a CMOS Camera. The Laser beam reach the pixel array and its position is determined by the calculation of the spot centroid, in real time, for each frame of the camera. This is calculated as follows:

$$x_{cm} = \frac{\sum_{i=1}^N m_i x_i}{\sum_{i=1}^N m_i}, y_{cm} = \frac{\sum_{j=1}^M m_j x_j}{\sum_{j=1}^M m_j} \quad (1)$$

Where x_{cm} and y_{cm} are the centroid coordinates over the x and y axis respectively. N and M are the numbers of pixels NxM of the camera and m_i and m_j are the photon count of each pixel (between 0 and 255) read from the x axis and the y axis, respectively

This operation implies reading all the pixels in the camera and then compute the operation of Eq 1. This may take several microseconds. In order to reduce the time spent by this operation, it has been simplified so the photon count m_i and m_j are considered equal to 1 when their value is above a predefined limit and 0 otherwise. In that way the time spent on this operation was reduces from $300[\mu s]$ to $80[\mu s]$. Another important point is the time spent getting a snapshot of the camera. In this case, the measurements show that this event take about $30[ms]$, setting the closed loop frequency in about $30[Hz]$. Of course this time can be reduced implementing this loop on a better PC or using high frame rates cameras.

3. RESULTS

We generate vibrations with the Vibration source on 8.5 Hz. The following image show the PSD of this vibration, without control, i.e. with the DM flat and the FSM on its origin position (0 [rads] in both axis).

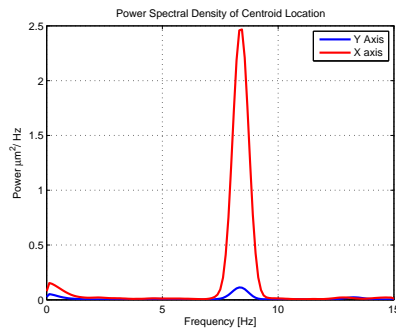


Figure 3: Power Spectral Density of the centroid movement without control in both axes

It can be seen that the power is concentrated about 8.5 [Hz], and the measurement has a maximum limit of 15 [Hz] due to the loop timing which iterates 30 times per second. There are differences between X and Y axis because of the placement of the vibration source, which generates vibration ideally in only one axis.

Now we test a PI controller for the system, under the same vibration. The result is shown in Fig 4 and in Fig 5

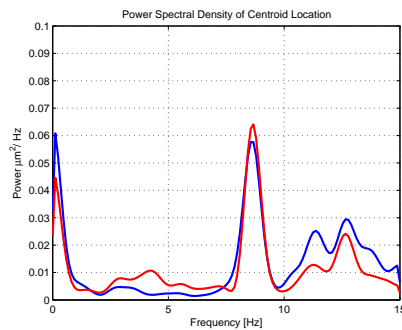


Figure 4: Power Spectral Density of the centroid movement with control in both axes

Without control, the power of the vibration around 8.5[Hz] for the Y axis is $0.1080[\mu m]^2$ and $2.1588[\mu m]^2$ for the X axis. With control it has been reduced to $0.0568[\mu m]^2$ and $0.0565[\mu m]^2$ respectively.

Table 1: Control Performance

	Without Control	With Control
Power [$\mu m^2/Hz$] at 8.5[Hz] X axis	2.1588	0.0565
Power [$\mu m^2/Hz$] at 8.5[Hz] Y axis	0.1080	0.0568
Total Power [$\mu m^2/Hz$] X axis	2.4196	0.1993
Total Power [$\mu m^2/Hz$] Y axis	0.2078	0.1739

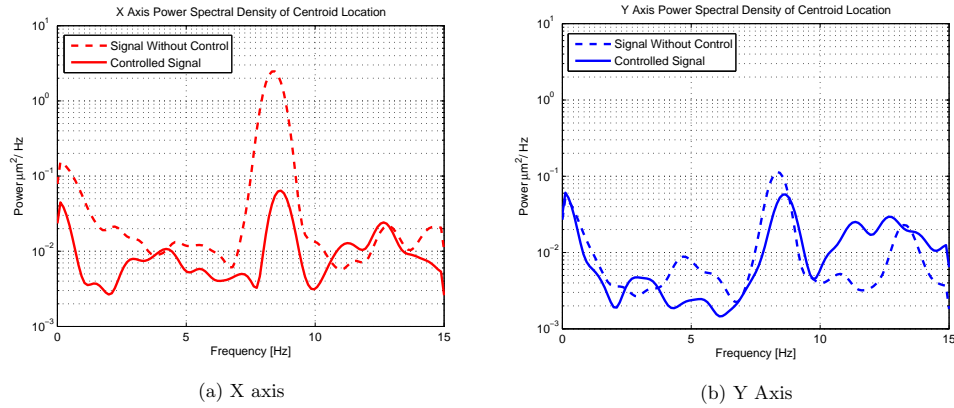


Figure 5: Closed Loop performance

4. CONCLUSIONS AND FUTURE WORK

Control Loop for tip and tilt compensation was shown and it has successfully performed for the range of frequency and amplitude fixed by the vibration source. For improve the performance of this loop, new FSMs and camera is studied in order to obtain higher time resolution (frequency of the loop) and spatial resolution (milliarcseconds that can be compensated). For future work, new methods and control algorithms will be studied, and the control loop will be tested for higher zernike modes using the FSM for tip and tilt compensation and a DM for higher modes compensation.

5. ACKNOWLEDGMENTS

We gratefully acknowledge the support of the Advanced Center for Electrical and Electronic Engineering (AC3E) and the Universidad Técnica Federico Santa María, as well as the financial support from CONICYT, Chile.

REFERENCES

- [1] Caroline Kulcsár et al, *Vibrations in AO Control: a Short Analysis of On-Sky Data Around the World.*, Proc. SPIE 8447, Adaptive Optics Systems III, 2012.
- [2] W. Brandner et al, *NAOS+CONICA at YEPUN: First VLT Adaptive Optics System Sees First Light.*, El Mensajero, No 107, 2002.
- [3] Y. Clénet et al, *NAOS Performances: Impact of the Telescope Vibrations and Possible Origins.*, SF2A-2004: Semaine de l'Astrophysique Française, 2004.
- [4] Michael Hess et al, *Strategy for Identifying and Mitigating Facility Vibrations to Improve Optical Performance at the W.M. Keck Observatory.*, Proceedings of SPIE Vol. 4837, 2003.
- [5] Andres Guesalaga et al, *Design of Frequency-Based Controllers for Vibration Mitigation at the Gemini-South Telescope.*, Proc. SPIE 8447, Adaptive Optics Systems III, 844711, 2012.
- [6] Andres Guesalaga et al, *Comparison of Vibration Mitigation Controllers for Adaptive Optics Systems.*, Applied Optics Vol. 51, No. 19, 2012.
- [7] Andres Guesalaga et al, *Mitigation of Vibrations in Adaptive Optics by Minimization of Closed-Loop Residuals.*, Optics Express, Vol. 21, Issue 9, pp. 10676-10696, 2013.
- [8] Newport, *FSM-300 Fast Steering Mirror and FSM-CD300B Controller/Driver.*, Newport Users Manual.
- [9] Edmund Optics, *EO-0413C 1/3" CMOS Color USB Lite Edition Camera.*, Edmund Optics Technical Information.
- [10] Measurement Computing, *USB-1208HS Series.*, Measurement Computing Series Data.

REFERENCIAS

- [1] Jackes M. Beckers, *Adaptive Optics for Astronomy: Principles, Performance, and Applications*. Annu Rev. Astron. Astrophys, 1993.
- [2] J.W. Hardy, *Adaptive Optics for Astronomical Telescopes*. Oxford Series in Optical and Imaging Sciences , Oxford, 1998.
- [3] Tyson R, *Introduction to Adaptive Optics*. SPIE Press, Bellingham Washington, 2000.
- [4] Anil K. Razdan, *Measurement of Atmospheric Turbulence Parameters Relevant to Adaptive Optic System Design*. Proc. SPIE 4976, Atmospheric Propagation, 124, 2003.
- [5] Peter Wizinowich, *Progress in Laser Guide Star Adaptive Optics and Lessons Learned*. Proc. SPIE 8447, Adaptive Optics Systems III, 84470D, 2012.
- [6] Daniel M. Topa, *Wavefront Reconstruction for the Shack-Hartmann Wavefront Sensor*. Proc. SPIE 4769, Optical Design and Analysis Software II, 101, 2002.
- [7] Ben C. Platt, Roland Shack, *History and Principles of Shack-Hartmann Wavefront Sensing*. Journal of Refractive Surgery, Volume 17, 2001.
- [8] Guy E. Artzner, *Microlens Arrays for Shack-Hartmann Wavefront Sensors*. Opt. Eng. 31(6), 1311-1322, 1992.
- [9] P-Y Madec, *Overview of Deformable Mirror Technologies for Adaptive Optics and Astronomy*. European Southern Observatory, Karl Schwarzschild Str 2, D-85748 Garching, 2012.
- [10] Virendra N. Mahajan, *Zernike Circle Polynomials and Optical Aberrations of Systems with Circular Pupils*. Supplement to Applied Optics, 1 December 1994.
- [11] Caroline Kulcsár et al, *Vibrations in AO Control: a Short Analysis of On-Sky Data Around the World.* , Proc. SPIE 8447, Adaptive Optics Systems III, 2012.
- [12] W. Brandner et al, *NAOS+CONICA at YEPUN: First VLT Adaptive Optics System Sees First Light.*, El Mensajero, No 107, 2002.
- [13] Y. Clénet et al, *NAOS Performances: Impact of the Telescope Vibrations and Possible Origins.* ,SF2A-2004: Semaine de l'Astrophysique Francaise, 2004.

-
- [14] Michael Hess et al, *Strategy for Identifying and Mitigating Facility Vibrations to Improve Optical Performance at the W.M. Keck Observatory.*, Proceedings of SPIE Vol. 4837, 2003.
- [15] Andres Guesalaga et al, *Design of Frequency-Based Controllers for Vibration Mitigation at the Gemini-South Telescope.*, Proc. SPIE 8447, Adaptive Optics Systems III, 844711, 2012.
- [16] Andres Guesalaga et al, *Comparison of Vibration Mitigation Controllers for Adaptive Optics Systems.*, Applied Optics Vol. 51, No. 19, 2012.
- [17] Andres Guesalaga et al, *Mitigation of Vibrations in Adaptive Optics by Minimization of Closed-Loop Residuals.*, Optics Express, Vol. 21, Issue 9, pp. 10676-10696, 2013.
- [18] Bruce Macintosh et al, *The Gemini Planet Imager.*, Proc. of SPIE Vol. 6272, 62720L, Advances in Adaptive Optics II, 2006.
- [19] Marcus Hartung ruce Macintosh et al, *On-sky vibration environment for the Gemini Planet Imager and mitigation effort.*, Proc. of SPIE Vol. 9148, 91480N, Adaptive optics Systems IV, 2014.
- [20] J.L. Lizon et al, *Different ways of reducing vibrations induced by cryogenic instruments.*, Proc. of SPIE Vol. 7739, 77394B, Modern Technologies in Space- and Ground-based Telescopes and Instrumentation, 2010.
- [21] Mario Castro et al, *Closed-loop control for tip-tilt compensation on systems under vibration.*, Proc. of SPIE Vol. 9909, Adaptive optics Systems V, 2016.
- [22] Mario Castro et al, *Closed loop for tip & tilt vibration mitigation.*, Optical Society of America paper Jt5A.28, Imaging and Applied Optics, 2015.