



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE  
ESCUELA DE INGENIERIA

**MEDICIÓN DE LA POSICIÓN DE  
ELEMENTOS OPTO-MECÁNICOS EN  
EL PLANO FOCAL DE UN  
TELESCOPIO MEDIANTE  
FOTOGRAMETRÍA DE ALTA  
PRECISIÓN**

**MAURICIO FABIÁN FLORES CABRALES**

Tesis para optar al grado de  
Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Profesor Supervisor:  
**LEONARDO VANZI**

Santiago de Chile, (Septiembre, 2018)

© MMXVIII, MAURICIO FABIÁN FLORES CABRALES



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE  
ESCUELA DE INGENIERIA

**MEDICIÓN DE LA POSICIÓN DE  
ELEMENTOS OPTO-MECÁNICOS EN  
EL PLANO FOCAL DE UN  
TELESCOPIO MEDIANTE  
FOTOGRAMETRÍA DE ALTA  
PRECISIÓN**

**MAURICIO FABIÁN FLORES CABRALES**

Tesis presentada a la Comisión integrada por los profesores:

**LEONARDO VANZI**

**DIEGO CELENTANO**

**ROLANDO DÜNNER**

**RODRIGO CIENFUEGOS**

Para completar las exigencias del grado de  
Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Santiago de Chile, (Septiembre, 2018)

*If you don't learn how to be scared,  
you'll never really learn how to be  
brave. -Simon Holt*

## AGRADECIMIENTOS

En primera instancia quisiera agradecer a mi profesor supervisor Leonardo Vanzi por su valiosa guía y tutela de este trabajo de Magíster. Si no fuera por él, no habría seguido por este vasto e interesante campo de investigación de la Astro-Ingeniería.

En segundo lugar, al Profesor Rolando Dünner, Abner Zapata, Holger Drass y Louise Dauvin, quienes fueron parte importante dentro del desarrollo de esta investigación, tanto por sus consejos técnicos como por su compañía en momentos complejos.

A mis amigos y compañeros del Centro de Astro-Ingeniería UC. Gracias a ellos este trabajo se hizo más divertido y ameno.

A Don Carlos Caire (Q.E.P.D.) por ser su valioso aporte como persona y como profesional dentro del transcurso de esta investigación.

Al personal técnico del taller mecánico de la Pontificia Universidad Católica de Chile, quienes aportaron con consejos de mecanizado y con la fabricación de algunos componentes que fueron requeridos para completar de manera óptima el objetivo de la tesis.

Al personal mecánico de la maestría del Observatorio La Silla, por prestar apoyo en la fabricación y modificación de algunas piezas mecánicas.

A mi pareja Camila Armijo, quien fue un pilar fundamental en estos años de investigación, soportando, aconsejando, corrigiendo y sobre todo apoyando cada decisión tomada.

A mi madre Gloria Cabrales, por ser quien me insta a seguir el camino del aprendizaje.

Para finalizar agradezco al proyecto CONICYT - Gemini 32130014 Por financiar este trabajo de tesis y permitir mi crecimiento académico.

## INDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS .....	iii
INDICE GENERAL.....	iv
INDICE DE TABLAS .....	vi
INDICE DE FIGURAS.....	vii
RESUMEN.....	x
ABSTRACT .....	xii
1. Introducción.....	1
1.1. Telescopio astronómico.....	3
1.1.1. Tolerancias mecánicas en el plano focal de un telescopio.....	4
1.1.2. Precisión requerida en el posicionamiento de una fibra en el plano focal de un telescopio .....	9
1.2. Instrumentos alimentados por fibras .....	11
1.2.1. Espectrógrafos alimentados por una fibra.....	11
1.2.2. Espectrógrafos multi-objetos .....	13
1.3. Objetivo.....	16
1.4. Hipótesis.....	16
2. Instalación de una fibra óptica .....	17
2.1. Introducción .....	17
2.1.1. Telescopio ESO 1 metro .....	17
2.1.2. Espectrógrafo FIDEOS .....	18
2.2. Problema.....	22
2.3. Soluciones .....	24
2.3.1. Análisis FEA.....	24
2.3.2. Fotogrametría de rango cercano.....	28
2.3.2.1. Herramientas.....	29
2.3.2.2. Procedimiento de medición .....	29

2.3.2.3.	Descripción del análisis de datos .....	31
2.4.	Resultados .....	33
2.4.1.	45° de inclinación .....	34
2.4.2.	15° de inclinación .....	36
2.4.3.	Test de laboratorio .....	38
3.	Instalación de N fibras ópticas .....	40
3.1.	Introducción .....	40
3.1.1.	Telescopio VLT .....	40
3.1.2.	Espectrógrafo MOONS .....	41
3.2.	Problemas y requerimientos .....	47
3.2.1.	Multiplicidad .....	48
3.2.2.	Rigidez y temperatura .....	50
3.2.3.	Fotogrametría de precisión .....	50
3.2.4.	Warm up de la cámara de metrología .....	51
3.3.	Soluciones .....	55
3.3.1.	Solución eléctrico-computacional .....	55
3.3.2.	Solución termo-mecánica .....	56
3.3.3.	Mediciones .....	70
3.4.	Resultados .....	76
3.4.1.	Distribución de la temperatura sin caja de metrología .....	76
3.4.2.	Distribución de temperatura con caja de metrología .....	77
3.4.3.	Desplazamientos obtenidos en cuerpo sin pernos con resorte .....	78
3.4.4.	Desplazamientos obtenidos en cuerpo con <i>plungers</i> .....	79
4.	Conclusiones y trabajo futuro .....	80
4.1.	Trabajo futuro .....	82
	Referencias .....	83

**INDICE DE TABLAS**

	Pág.
Tabla 2.1 Principales características de FIDEOS .....	19
Tabla 2.2 Errores en cada eje en sistema GSI para medición en 45° .....	35
Tabla 2.3 Errores en cada eje en sistema GSI para medición en 45° .....	37
Tabla 3.1 Parámetros instrumentales de MOONS .....	42

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Full Width Half Maximum de la curva de luz de la imagen proyectada en el plano focal de un objeto astronómico. ....	6
Figura 1.2 Desplazamiento posible del target astronómico en el <i>pinhole</i> (a) e imágenes de cómo se ve un objeto astronómico pasando a través de un <i>pinhole</i> perfectamente centrado (b) (Avila & Guirao, 2009).....	8
Figura 1.3 Eficiencia vs <i>seeing/pinhole</i> para diferentes valores de descentramiento de la imagen del objeto astronómico en el <i>pinhole</i> .....	8
Figura 2.1 Telescopio ESO 1 metro .....	17
Figura 2.2 Diseños óptico y mecánico del espectrógrafo FIDEOS .....	19
Figura 2.3 Disposición de FIDEOS .....	20
Figura 2.4 Diseño mecánico de la Interfaz Telescopio-Instrumento. ....	21
Figura 2.5 Gráfica eficiencia vs <i>seeing</i> caso FIDEOS.....	23
Figura 2.6 Desplazamiento de la Interfaz Telescopio-Instrumento .....	24
Figura 2.7 Diseño renovado de la Interfaz Telescopio-Instrumento.....	25
Figura 2.8 Desplazamiento presentado en la Interfaz para una inclinación de 45°y gravedad + 150 N.....	26
Figura 2.9 Desplazamiento presentado en la Interfaz para 15° y gravedad + 150 N.....	27
Figura 2.10 Desplazamiento presentado en la Interfaz para 15°, gravedad + 150 N y conexiones holgadas.....	28
Figura 2.11 <i>Targets, coded targets y scale bar</i> en la Interfaz Telescopio-Instrumento ..	30
Figura 2.12 Pesos colgando de la Interfaz Telescopio-Instrumento .....	31
Figura 2.13 Interfaz de usuario V-Stars .....	32
Figura 2.14 Nube de puntos generada para la Interfaz Telescopio-Instrumento .....	33
Figura 2.15 Desplazamiento obtenido para 45° y peso incluido.....	34
Figura 2.16 Vectores normalizados de desplazamiento para 45° con peso incluido .....	35
Figura 2.17 Desplazamiento obtenido para 15° y peso incluido.....	36
Figura 2.18 Vectores normalizados de desplazamiento para 15° con peso incluido .....	37
Figura 2.19 Desplazamiento obtenido para 21° en laboratorio.....	38

Figura 2.20 Vectores normalizados de desplazamiento para 21° en laboratorio. ....	39
Figura 3.1 Dibujo mecánico y <i>layout</i> óptico demostrativo de los componentes de los telescopios unitarios VLT .....	41
Figura 3.2 Espectrógrafo MOONS montado en el foco <i>Nasmyth</i> del telescopio.....	43
Figura 3.3 <i>Fiber Positioning Units (FPUs)</i> .....	44
Figura 3.4 Diseño CAD de los FPU's, <i>fiducials</i> y una cámara de adquisición (seccionada) montados en un trozo de <i>plate</i> .....	46
Figura 3.6 Diseño CAD de parte de la estructura RFE.....	47
Figura 3.7 Gráfica <i>seeing</i> vs eficiencia caso MOONS. ....	49
Figura 3.8 Desalineamiento del eje óptico de una cámara debido a un aumento de temperatura.....	53
Figura 3.9 Promedio (a) y desviación estándar (b) de los corrimientos de los targets en el detector.....	53
Figura 3.10 Resultados de medición de desplazamientos en cámara IDS UI-3590 CP Rev. 2 .....	54
Figura 3.11 Resultado de medición de distribución de temperatura en cámara IDS UI-3590 CP Rev. 2 .....	55
Figura 3.12 Resultados obtenidos por (Dauvin et al., 2017) utilizando la función <i>pixel clock</i> .....	56
Figura 3.13 Modelos CAD de cámara IDS UI-3590 CP Rev. 2 .....	57
Figura 3.14 Parámetros de análisis FEA en cámara IDS UI-3590 CP Rev. 2 .....	59
Figura 3.15 Distribución de la temperatura en la tarjeta de la cámara IDS UI-3590 CP Rev. 2 .....	60
Figura 3.16 Distribución de la temperatura desde la tarjeta hacia el exterior del cuerpo de la cámara IDS UI-3590 CP Rev. 2.....	60
Figura 3.17 Deformación mecánica en la cámara IDS UI-3590 CP Rev. 2 debido a la distribución de temperatura en el cuerpo completo .....	61
Figura 3.18 Modelo de cámara IDS UI-3591LE.....	62
Figura 3.19 Diseño CAD del nuevo modelo de cámara de metrología .....	64

Figura 3.20 Resultado del análisis térmico en el nuevo cuerpo de la cámara.....	66
Figura 3.21 Diseño mecánico de montura auto-centrante.....	67
Figura 3.22 Modelo optimizado de la tarjeta con resortes para el análisis FEA.....	68
Figura 3.23 Desplazamientos presentados en la tarjeta posterior a un aumento de temperatura de 6° K .....	69
Figura 3.24 Cuerpo principal de la carcasa.....	71
Figura 3.25 Montajes simples de la carcasa de la cámara.....	71
Figura 3.26 Diseño CAD (a) y diseño fabricado (b) de la caja de metrología.....	72
Figura 3.27 Disposición de la cámara con la nueva carcasa dispuesta a ser testeada.....	73
Figura 3.28 Cámara montada en la caja de metrología.....	74
Figura 3.29 Fotografía infrarroja de la cámara de metrología .....	76
Figura 3.30 Fotografía infrarroja de la cámara de metrología en su caja contenedora montada en la estructura de aluminio.....	77
Figura 3.31 Promedio (a) y desviación estándar (b) obtenidos para la nueva cámara sin pernos con resorte. ....	78
Figura 3.32 Promedio (a) y desviación estándar (b) obtenidos para la nueva cámara con resortes. ....	79

## RESUMEN

En la presente investigación se han estudiado y utilizado técnicas y tecnologías para la medición de elementos opto-mecánicos en el plano focal de un telescopio, para determinar la posición de sistemas que adquieren luz de targets astronómicos, con el objeto de obtener un óptimo desempeño en la alimentación de los instrumentos, logrando así una alta eficiencia en cada sistema. Para alcanzar el objetivo propuesto, se utilizó la técnica de medición no invasiva, que se basa en la reconstrucción de la imagen mediante fotografías 2D a un ambiente 3D con el fin de medir dimensión y posición de un objeto en el espacio, llamada fotogrametría. Se aplicó la fotogrametría a dos casos prácticos, en los telescopios ESO 1m y ESO VLT (*Very Large Telescope*).

El proyecto estuvo enmarcado en dos espectrógrafos alimentados por fibra óptica, FIDEOS (*Fiber Dual Echelle Optical Spectrograph*) y MOONS (*Multi-Object Optical and Near-infrared Spectrograph*). En el espectrógrafo FIDEOS se midió el desplazamiento del sistema de adquisición de luz, utilizando la técnica de fotogrametría con un sistema comercial y herramientas de análisis computacional (diseño CAD, análisis mediante elementos finitos). En cuanto al instrumento multi-objetos MOONS, se optimizó la performance de la cámara de metrología, que realiza el proceso de fotogrametría para medir la posición de los brazos que trasladan las fibras que reciben la luz de las estrellas, a través de un nuevo diseño opto-mecánico de cámara que favorece la disipación de calor del detector hacia el ambiente circundante. El método utilizado en FIDEOS evidenció un desplazamiento máximo de 95 micrones utilizando el análisis de elementos finitos y un valor RMS de 167 micrones por fotogrametría. La optimización realizada a la cámara de

metrología de MOONS permitió disminuir la temperatura en 6°C respecto al estado anterior y mantener el estado de desplazamientos en el detector en el orden de 0.1 píxeles. Los resultados obtenidos para ambos casos demuestran que las técnicas y tecnologías utilizadas, permiten medir la posición de un objeto en el plano focal de un telescopio y además ayudan a optimizar su desempeño.

Palabras Claves: Instrumentación astronómica, espectroscopía, opto-mecánica, fotogrametría de rango cercano, análisis por elementos finitos.

## ABSTRACT

In this research has been studied and utilized techniques and technologies for the measurement of optomechanical elements on the focal plane of a telescope, to determine the position of systems that acquire light from an astronomical target, with the aim to obtain an optimal performance in the feeding of the instruments, achieving a high efficiency in every system. To attain the objective proposed has been used the non-invasive measurement technique, based in the reconstruction of an image by means of 2D images to a 3D environment, with the goal of measure its dimension and position in the space, called Photogrammetry. The photogrammetry technique was applied in two practical cases, on the ESO 1m and ESO VLT (Very Large Telescope) telescopes.

This project was focused in two fiber-feed optical spectrographs, FIDEOS (Fiber Dual Echelle Optical Spectrograph) and MOONS (Multi-Object Optical and Near-infrared Spectrograph).

In the spectrograph FIDEOS, it was measured the displacement of the light acquisition system, using a commercial photogrammetry equipment and computational analysis tools (CAD design and element finite analysis). Regarding MOONS, it was optimized the performance of the metrology camera, that makes the photogrammetry process, to measure the position of robotic arms which moves the fibers that receive the light from the stars, through a new optomechanical design of the camera that helps the heat dissipation from the detector to the surrounding environment. The method used in FIDEOS evidenced a maximum displacement of 95 microns, using FEA analysis and a RMS value of 167 microns by photogrammetry. The optimization done in the metrology

camera of MOONS allowed a decreasing of the temperature of 7°C with respect to the previous state and maintain the status of the displacements on the detector in the order of 0.1 pixels. The results obtained for both cases prove that the utilized techniques and technologies, allow to measure the position of an object on the focal plane of a telescope and further, help to optimize its performance.

Keywords: Astronomical Instrumentation, spectroscopy, opto-mechanics, close-range photogrammetry, finite element analysis.

## 1. INTRODUCCIÓN

La instrumentación astronómica comprende todas las herramientas utilizadas para la observación y análisis de objetos o fenómenos que ocurren en el universo. Éstas pueden ser separadas en dos grandes categorías. La primera, incluye todos los elementos que permiten la observación y colección de luz de objetos celestes, los telescopios. La segunda categoría se refiere a los instrumentos auxiliares que son utilizados para registrar o analizar los datos obtenidos mediante el equipo observacional, como cámaras, espectrógrafos, interferómetros, etc. Gracias a estas tecnologías ha sido posible llevar las fronteras del conocimiento a límites inimaginables para científicos de hace siglos.

El desarrollo de este campo está en rápido avance y muchas instituciones y universidades en el mundo han invertido en diseñar telescopios e instrumentos que respondan a los crecientes requerimientos de la comunidad astronómica. Es así como el Centro de Astro-Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica de Chile ha apostado por el desarrollo de instrumental en Chile desde 2009, liderando el avance de este campo en el país y paralelamente ha generado lazos con importantes instituciones internacionales.

Este trabajo de tesis se enfoca en una problemática común a muchos instrumentos astronómicos: el posicionamiento y medición con alta precisión de elementos opto-mecánicos en el plano focal de un telescopio. En particular la técnica desarrollada como parte de este trabajo se ha aplicado y comprobado en dos de los proyectos llevados a cabo por el AIUC: FIDEOS (*Fiber Dual Echelle Optical Spectrograph*) instrumento que corresponde al primer espectrógrafo de alta resolución “made in Chile”, alimentado por una fibra óptica y MOONS (*Multi Object Optical and Near-infrared Spectrograph*)

espectrógrafo multi-objetos alimentado por alrededor de 1000 fibras ópticas. En ambos instrumentos se hará uso de la técnica fotogramétrica para la medición de la posición de targets astronómicos en el plano focal de los telescopios ESO 1m y ESO VLT. En FIDEOS se medirá el desplazamiento de la Interfaz Telescopio-Instrumento, que sostiene la fibra óptica que adquiere la luz y se comparará con resultados obtenidos mediante análisis numéricos y en MOONS, se llevará a cabo una optimización termo-mecánica de la cámara de metrología, haciendo uso de análisis por métodos numéricos y validación mediante test en laboratorio.

El orden de los elementos de esta tesis es como sigue: introducción al concepto de telescopio astronómico y tópicos relacionados al mismo, objetivos del trabajo y la hipótesis de la investigación se presentan en la sección 1. La sección 2 corresponde al caso de estudio del instrumento FIDEOS, la problemática del sistema, desarrollo de soluciones y sus resultados concluyendo con el análisis mediante fotogrametría. En la sección 3 se presenta el trabajo realizado en el sistema de calibración y metrología de MOONS, haciendo énfasis en la optimización de la cámara, abordándose los mismos puntos que en FIDEOS. En la sección 4 se presentan conclusiones para cada caso y se finaliza con la proyección del trabajo futuro.

### **1.1. Telescopio astronómico**

El primer telescopio astronómico fue desarrollado por Galileo Galilei en 1609, este correspondía a un “tubo” que contenía a lo largo de su extensión, dos lentes. El primer elemento es el objetivo, el cual capta la luz del objeto observado y segundo, el ocular, permite la observación con el ojo humano. Al ser un telescopio pequeño era manipulado con relativa facilidad y permitió observar por primera vez imperfecciones en la Luna, las lunas de Júpiter, las fases de Venus, Saturno y la Vía Láctea. Quien movía el telescopio era el observador, por lo que la precisión en el seguimiento y enfoque de un objeto dependía netamente de su pericia y delicadeza de movimiento. Posterior a este revolucionario invento prosiguió el desarrollo de un sin número de telescopios refractores. Desde 1608 hasta 1896 se fue incrementando el diámetro del lente objetivo, llegando al máximo de los exponentes: el telescopio refractor de 40” del Observatorio Yerkes. A pesar de incrementar su área de recolección de luz, los telescopios refractores estaban limitados por su longitud y peso, que conllevaba grandes deflexiones mecánicas.

En 1671 Isaac Newton presentó un diseño revolucionario de telescopio, reflector, a la Sociedad Real en Londres que consistía en la utilización de un espejo como objetivo en vez de lentes, evitando la aberración cromática y permitiendo incrementar en área de recolección de luz.

Posterior a la presentación de este nuevo telescopio reflector hasta el día de hoy se han desarrollado variados tipos de telescopios reflectores, de diferentes formas y tamaños, con curvatura fija o deformable, montados en tierra y en el espacio (Majewski, 2017).

Los telescopios, ya sean refractores o reflectores deben lidiar con diferentes fenómenos medioambientales que merman su desempeño, ya sea la atmosfera, los cambios de temperatura del medio, la gravedad, el viento, vibraciones, entre otros (Bely, 2003). Con el avance de la tecnología se han desarrollado múltiples técnicas y métodos para sobrellevar estos fenómenos y mantener al telescopio estable y “protegido”, pudiendo así obtener datos de las estrellas fielmente. Cabe destacar que las soluciones aplicadas para un telescopio en específico son diferentes respecto a otro telescopio, teniendo cada uno de ellos ciertas tolerancias permitidas que dependerán de la ciencia que se desee realizar.

### 1.1.1. Tolerancias mecánicas en el plano focal de un telescopio

El plano focal de un telescopio corresponde al área en donde se forma la imagen del objeto observado. Cada telescopio posee su propia escala (*Plate Scale*) que proyecta un ángulo observado en el cielo en un segmento de largo definido en su plano focal. Este valor está relacionado con la focal efectiva del telescopio, siendo definido como:

$$Plate\ Scale\left(\frac{''}{mm}\right) = \frac{206265}{f_{efect}(mm)} \quad (1.1)$$

Donde:

$f_{efect}$ : valor de la focal efectiva del telescopio en milímetros.

206265: valor para la conversión adecuada desde radianes a arco-segundos.

La unidad de medida que representa al *Plate Scale* es arco-segundos por milímetros ("/mm).

Como un ejemplo cuantitativo, si se considera un ángulo en el cielo de 1" y la escala del telescopio es de 10 "/mm, este se proyecta en el plano focal con un tamaño de 0.1 mm.

La imagen de un objeto (*target*) astronómico en el plano focal no es fija, sino que se mueve, aumenta y disminuye de tamaño debido a movimientos del telescopio y a turbulencias del aire, tanto internas como externas, por lo que enfocar y centrar la imagen del objeto en el sistema de adquisición de la luz no es una tarea trivial.

El parámetro relacionado con la turbulencia atmosférica y que define el “tamaño aparente del *target* astronómico” en el cielo, es llamado *seeing*, que corresponde al valor FWHM (*Full Width Half Maximum*) de la curva de intensidad de la luz, ver Figura 1.1. El valor  $x_2-x_1$  es típicamente medido en pixeles de una imagen astronómica y luego convertida a arco-segundos usando el *Plate Scale* del telescopio. Esta variable es el principal factor de consideración para la elección de un sitio astronómico, mientras más pequeño el valor de *seeing*, mejor el sitio.



Donde:

$\phi f$ : diámetro del agujero por donde ingresa la luz en micrones

$\phi s$ : seeing en arco-segundos

$ps$ : Plate scale del telescopio en micrones/arco-segundos

Es posible verificar que la eficiencia en la entrada de luz nunca podrá ser del 100%, aunque la imagen esté totalmente centrada y enfocada, debido a que el flujo se encuentra limitado por el *seeing* (ver Figura 1.2 b)

La Figura 1.3 presenta un gráfico que relaciona la eficiencia en el traspaso de luz a través de un *pinhole*, (como ejemplo de sistema de adquisición de luz), con la relación *seeing/pinhole*, para distintos valores de descentramiento de la imagen de la estrella respecto al foco. Cabe destacar que el análisis supone un flujo homogéneo en toda la sección transversal de la imagen del objeto astronómico y no una curva gaussiana como la mostrada en Figura 1.1 y representada por la ecuación 1.1, que presenta menos flujo hacia el exterior y más hacia el interior. Debido a esto, se debe establecer un valor *offset* de seguridad en las eficiencias medidas en cada sistema.

A su vez, deben ser estimadas las tolerancias mecánicas con respecto a la temperatura ambiental que se presenta en el plano focal. Mayoritariamente los sistemas de captación de luz están a la misma temperatura que el ambiente, mientras que en otros existen dispositivos que generan calor y cambian el frente de onda entrante, distorsionando así la forma de la imagen de la estrella. De esta manera, debe calcularse una tolerancia máxima de diferencia de temperatura de esos sistemas respecto al ambiente que los circunda.

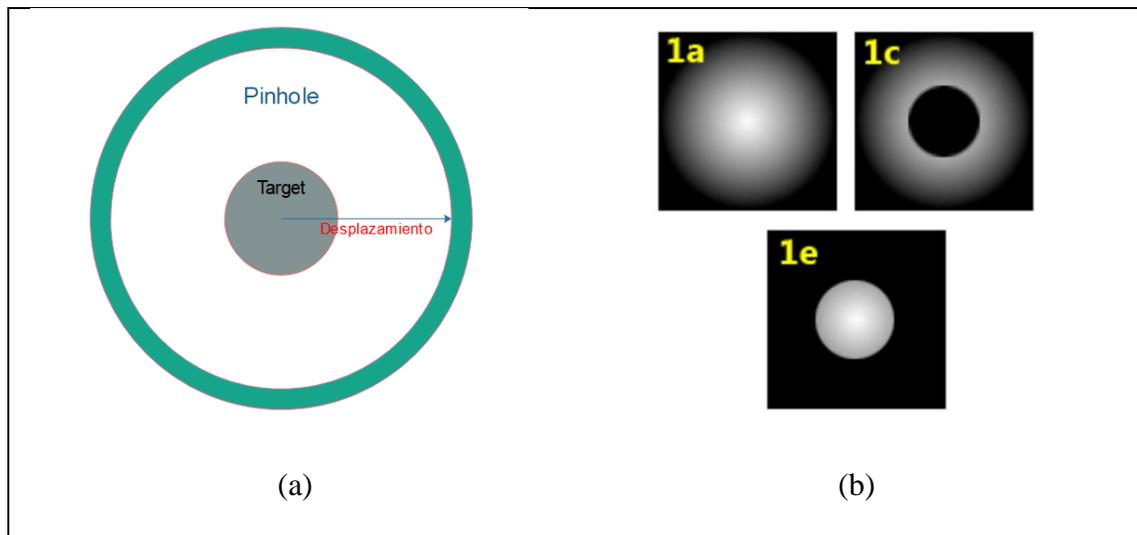


Figura 1.2 Desplazamiento posible del target astronómico en el *pinhole* (a) e imágenes de cómo se ve un objeto astronómico pasando a través de un *pinhole* perfectamente centrado (b) (Avila & Guirao, 2009).

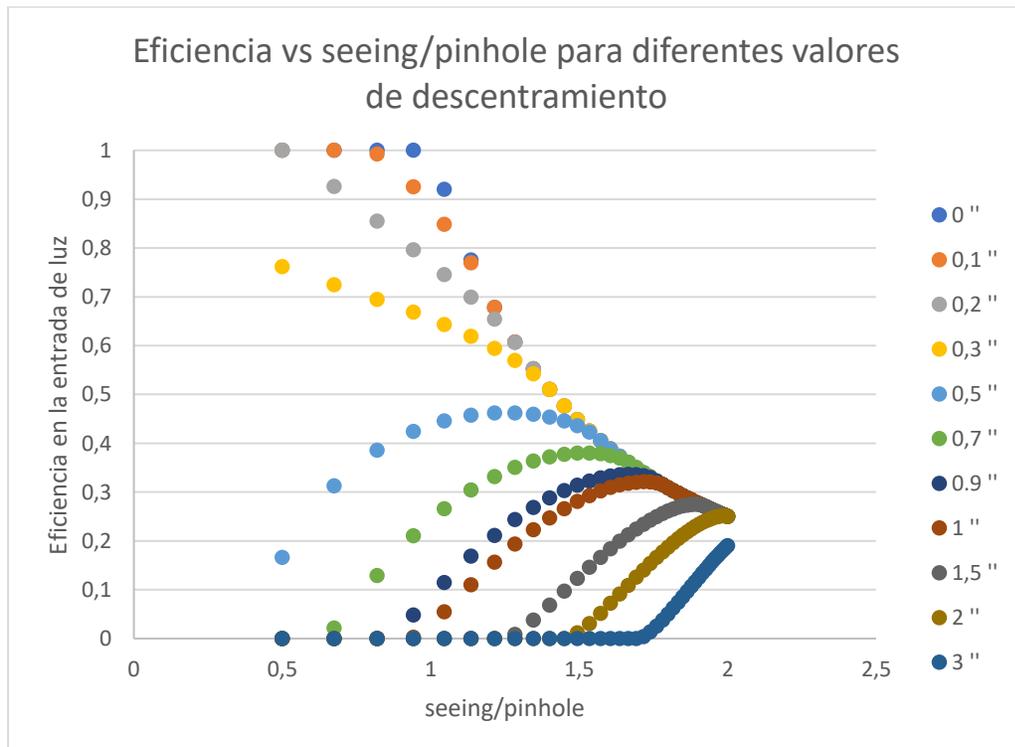


Figura 1.3 Eficiencia vs *seeing/pinhole* para diferentes valores de descentramiento de la imagen del objeto astronómico en el *pinhole*.

### **1.1.2. Precisión requerida en el posicionamiento de una fibra en el plano focal de un telescopio**

Los telescopios trabajan conjuntamente a un instrumento que procesa la información proveniente de las estrellas, de diversos tipos (cámaras, espectrógrafos, polarímetros, etc.) y donde cada uno de ellos responde a un objetivo científico en específico. Los espectrógrafos alimentados mediante fibra óptica permiten ser instalados alejados del telescopio, ya sea en una plataforma cercana o en salas contiguas al domo. Gracias a esto, es posible mejorar las condiciones de maniobrabilidad y posibilitar la estabilización del ambiente circundante del instrumento para su óptimo desempeño.

Para llevar a cabo la separación telescopio-instrumento, se requiere de una interfaz mecánica que se fije al telescopio y que sostenga un extremo de la fibra óptica perfectamente situada en el foco y alineada con el eje óptico, considerando las tolerancias mecánicas establecidas previamente. La mayoría de los sistemas actuales que utilizan una sola fibra óptica, hacen uso de un sistema óptico que permite redimensionar la imagen de la estrella para que ingrese perfectamente en ella (la que puede o no tener el mismo tamaño de la imagen de la estrella en el plano focal). Estos sistemas ópticos pueden incluir la instalación de sistemas mecánicos que permitan maniobrar la montura de la fibra alineándola con el eje óptico, proveyendo un mejor control de posición del sistema.

Para el caso de la instalación de múltiples fibras, el escenario se complejiza, debido a que cada una de esas fibras necesita calzar perfectamente con la imagen de una estrella, todas con la misma exactitud y precisión. El instrumento APOGEE utiliza un plato que contiene una cierta cantidad de orificios en posiciones determinadas que dependen del campo de

vista a observar y en cada uno de ellos se adhieren las fibras. El proceso de instalación de cada una de las fibras es realizado manualmente. En las alternativas más prácticas y eficientes, las monturas se adaptan a los diferentes campos de vista observados, trasladando a la fibra a través del plano focal con el fin de posicionar cada una de ellas en los objetos. Este proceso se realiza mediante sistemas automáticos.

Considerando ambos casos, una fibra o multi-fibras, la precisión requerida en el posicionamiento de ellas en el plano focal dependerá, en primer lugar, del telescopio y sus dimensiones, en segundo lugar, de la respuesta al impulso del sistema al *seeing*, de la precisión del sistema mecánico que sujeta la fibra y en último lugar de las tolerancias admitidas en el sistema.

Detallando cada aspecto mencionado:

**Telescopio y sus dimensiones:** este parámetro se relaciona con el *Plate Scale*, el que registrará el tamaño del objeto observado en plano focal, independiente del tamaño aparente en el cielo.

**Respuesta al impulso del sistema al seeing:** este parámetro se relaciona con el *Seeing* del lugar (calidad del cielo). Típicamente, en un buen lugar, este parámetro tiene un valor menor a 1 arco-segundo.

**Precisión de la mecánica:** este parámetro es definido por la calidad que se obtiene del proceso de mecanizado y ensamblado de la montura de la fibra.

**Tolerancia admitida en el sistema:** la tolerancia mecánica, como fue mencionada en el capítulo previo, dependerá de los requerimientos del instrumento.

## **1.2. Instrumentos alimentados por fibras**

En esta sección específicamente se presentará el estado de arte acerca del comienzo del uso de la fibra óptica como opción de alimentación para espectrógrafos de alta resolución y multi-objetos y también se presentan algunos ejemplos de instrumentos que utilizan este medio.

### **1.2.1. Espectrógrafos alimentados por una fibra**

#### **1.2.1.1. Historia**

*Desde mediados de los años 80, la alternativa propuesta de los espectrógrafos alimentados por fibra ha sido una interesante solución al problema de flexión encontrado en instrumentos Cassegrain (Hearnshaw, 2009).*

El desarrollo de este nuevo medio de alimentación fue liderado por un grupo de investigadores de la Universidad de Pennsylvania, los cuales instalaron una fibra al foco *Cassegrain* de su telescopio de 1.6 m en el año 1984 (Ramsey & Huenemoerder, 1986). Esto les permitió instalar el instrumento en una sala controlada ambientalmente y dejarlo estable sobre una mesa óptica. Además, la inclusión de la fibra, que genera *scrambling* en la luz, hace menos sensibles estos instrumentos a errores de *guiding* (guiaje) del telescopio, debido a la homogeneización de la luz al interior de ella (Heacox, 1986; Hearnshaw, 2009; Hunter, T. R. & Ramsey, 1992).

Seguido a este primer acercamiento siguieron otros grupos de otras universidades como Landessternwart, Heidelberg en 1987, Kitt Peak en 1987 y en el Monte John en Nueva Zelanda en 1988.

### 1.2.1.2. Ejemplos actuales

En la actualidad, el espectrógrafo de alta resolución con mayor precisión en la búsqueda de planetas, mediante el método de velocidades radiales, es HARPS (F. Pepe et al., 2000) instalado en el telescopio ESO 3.6 metros en el Observatorio La Silla. Gracias a este instrumento de muy alta resolución se han podido descubrir al menos 100 planetas extrasolares. En la misma línea, ESPRESSO (F. A. Pepe et al., 2010) es un instrumento recientemente instalado en el observatorio Paranal, el cual representa la evolución a HARPS, siendo aún más potente. Este instrumento tiene como fin encontrar planetas de igual y menor tamaño que la Tierra. La primera luz de ESPRESSO fue en 6 de diciembre de 2017. Cabe destacar que el instrumento utiliza la luz de los cuatro VLT's, teniendo el poder colectivo de un telescopio de 16 metros. Existen otros espectrógrafos de menor resolución y precisión que también tienen como fin descubrir planetas, pero de tamaño mayor o igual a Júpiter. FEROS (Kaufer & Pasquini, 1998) corresponde a un instrumento montado en mesa óptica, instalado y funcionando en el telescopio ESO 2.2 metros en La Silla. Este instrumento al igual que su vecino HARPS, ha permitido encontrar decenas de planetas. FIDEOS (Tala et al., 2014) es un instrumento similar a FEROS, está montado sobre mesa óptica, recientemente instalado en el Telescopio ESO 1 metro en La Silla. Este instrumento está optimizado, en la búsqueda de planetas y astro-sismología

## 1.2.2. Espectrógrafos multi-objetos

### 1.2.2.1. Historia

El primer acercamiento a la espectroscopia multi-objetos se obtuvo al utilizar el espectrógrafo de prisma, que permitía tener más de un espectro simultáneamente. Esta solución fue la única existente desde 1855 hasta que alrededor de 1980 dos nuevas soluciones nacieron como opción al espectrógrafo de prisma: *aperture plate* (plato con orificios) en conjunto con un elemento de baja dispersión y el uso de fibras ópticas. *El aperture plate fue introducido por Harvey Butcher en Kitt Peak in 1980 como una forma de tomar espectroscopía multi-objeto de objetos débiles, todos dentro de un campo de vista de 5 arco-minutos en el foco Cassegrain del telescopio Mayall de 4 metros. Consistía en un disco de aluminio anodizado con perforaciones de un diámetro aproximado de 2.5 arco-segundos en el cielo, situado en el foco del telescopio.* (Hearnshaw, 2009). Este espectrógrafo usaba un lente doblete como colimador, un grisma (conjunción de grilla de difracción con prisma) y una cámara criogénica. La eficiencia en este instrumento era bastante alta, debido que los orificios permitían el traspaso directo de la imagen del objeto al espectrógrafo, pudiendo obtener datos de objetos realmente débiles. La deficiencia de este método recaía en el tiempo necesitado para preparar cada placa previamente, para cada campo de vista a observar. Como una opción a la utilización del *aperture plate* con el elemento dispersor, nació la idea de utilizar fibras ópticas que transmitan la información desde el plano focal hacia un instrumento contiguo. El primer instrumento en utilizar este método fue el espectrógrafo Medusa (J. M. Hill, Angel, & Richardson, 1984), implementado por John Hill y colegas, en el telescopio de 2.3 metros en el observatorio

Steward, obteniendo su primer resultado en el año 1979. La ventaja de la inclusión de las fibras en los *aperture plate* radicaba en los buenos resultados que tenía al obtener mediciones de velocidad radial.

Posterior a estos espectrógrafos multi-objetos basados en *aperture plate* comenzó el estudio y desarrollo de posicionadores robóticos de fibra en el plano focal del telescopio con el fin de agilizar la observación entre campos observados sin perder tiempo en fabricar la placa y la instalación de la misma en el telescopio. Es así como a principios de 1982 se comienza la primera discusión acerca del diseño conceptual del primer instrumento basado en esta técnica, llamado MX spectrometer (John M. Hill, 2001), sucesor de Medusa. El primer test del instrumento se realizó meses después en el telescopio Stewart de 2.3 metros. El diseño consideraba 32 fibras arregladas de manera tal que pudiesen cubrir un sector de 45 arco-minutos posicionadas con una precisión de algunas décimas de arco-segundos mediante el uso de motores de paso micro-procesada y micro-controladamente. Uno de ellos controlaba la posición radial de la fibra y el otro controlaba un pivote de la fibra. Según las primeras mediciones, sistema al cambiar de un cambio a otro, mostraba una precisión en el posicionamiento de las 32 fibras de alrededor de 90 arco-segundos, mejorando la eficiencia relativa de observación de los *aperture plate*, como Medusa.

### 1.2.2.2. Ejemplos actuales

Posterior a Medusa, se han desarrollado varios espectrógrafos que utilizan distintos métodos de posicionamiento de las fibras en el plano focal. FLAMES (Pasquini et al., 2002), instalado en 2002 en el UT2 Kueyen del VLT, corresponde a un espectrógrafo multi-objeto, intermedio y de alta resolución, que utiliza 132 fibras instaladas en diferentes *plates*, que se cambian instantáneamente después de cada observación mediante el posicionador de las fibras OzPoz (Gillingham, Miziarski, & Klauser, 2000). Hectoechelle (Szentgyorgyi et al., 2011), corresponde a un espectrógrafo multi-objeto situado en el observatorio MMT en Arizona, instalado en 2003, el cual utiliza 240 fibras, posicionadas en el plano focal por el robot Hectospec. Hydra (James, 2011), un espectrógrafo instalado en 1998 en el telescopio Blanco de 4 metros en Observatorio Internacional Cerro Tololo, analiza el cielo con sus 138 fibras. Dentro de los próximos años serán instalados variados instrumentos con un gran número de fibras, por ejemplo: 4MOST (Haynes et al., 2014), será un instrumento por instalar en el telescopio VISTA en VLT, que utilizará alrededor de 2400 fibras. El instrumento FMOS (Tamura et al., 2016) también analizará el espacio con cerca de 2400 fibras en el telescopio Subaru de 8.2 metros en el Observatorio de Mauna Kea. El espectrógrafo MOONS (Cirasuolo et al., 2014) será capaz de obtener información de más de 1000 objetos en el cielo, será instalado en un telescopio VLT en el Observatorio Paranal. También se encuentran en “fase a” espectrógrafos multi-objetos para los telescopios gigantes E-ELT (*European Extremely Large Telescope*), GMT (*Giant Magellan Telescope*) y TMT (*Thirty Meter Telescope*), ya sea MOSAIC (Hammer et al., 2016), GMACS (DePoy et al., 2012) e IRMOS (Eikenberry et al., 2006) respectivamente.

### **1.3. Objetivo**

El principal objetivo de este trabajo es desarrollar y testear técnicas y tecnologías para la medición de objetos en el plano focal de un telescopio astronómico con alta precisión.

Los objetivos específicos corresponden a:

- Usar la técnica fotogramétrica en la medición de la deflexión de la Interfaz Telescopio-Instrumento del espectrógrafo FIDEOS.
- Optimizar la técnica fotogramétrica del sistema de metrología y calibración del espectrógrafo multi-objetos MOONS.

### **1.4. Hipótesis**

Este trabajo de tesis presenta dos hipótesis:

1. A través de los resultados obtenidos mediante el uso de fotogrametría, será posible probar que la Interfaz Telescopio-Instrumento satisface el requerimiento propuesto de permitir un máximo desplazamiento de 33 micrones frente a su propio peso.
2. Optimizando el sistema de metrología y calibración de MOONS, será posible cumplir con el requisito de presentar una máxima dispersión de los centroides fotografiados en el detector de 0.1 pixeles y exceso máximo de temperatura en el objetivo sobre el medioambiente de 1 °C.

## 2. INSTALACIÓN DE UNA FIBRA ÓPTICA

En este capítulo se describe el caso de instalación de una fibra óptica en el telescopio ESO 1 metro instalado en La Silla que alimenta al espectrógrafo FIDEOS.

### 2.1. Introducción

#### 2.1.1. Telescopio ESO 1 metro

El telescopio ESO 1 metro fue el primer telescopio instalado en el Observatorio La Silla, viendo su primera luz el 30 de noviembre de 1966. Corresponde a un telescopio del tipo Cassegrain con una relación focal  $f/13.6$ . Tiene una montura ecuatorial en horquilla, un espejo primario con un diámetro de 1040 mm y un espejo secundario de 215 mm. La Figura 2.1 muestra más información y datos útiles del mismo.

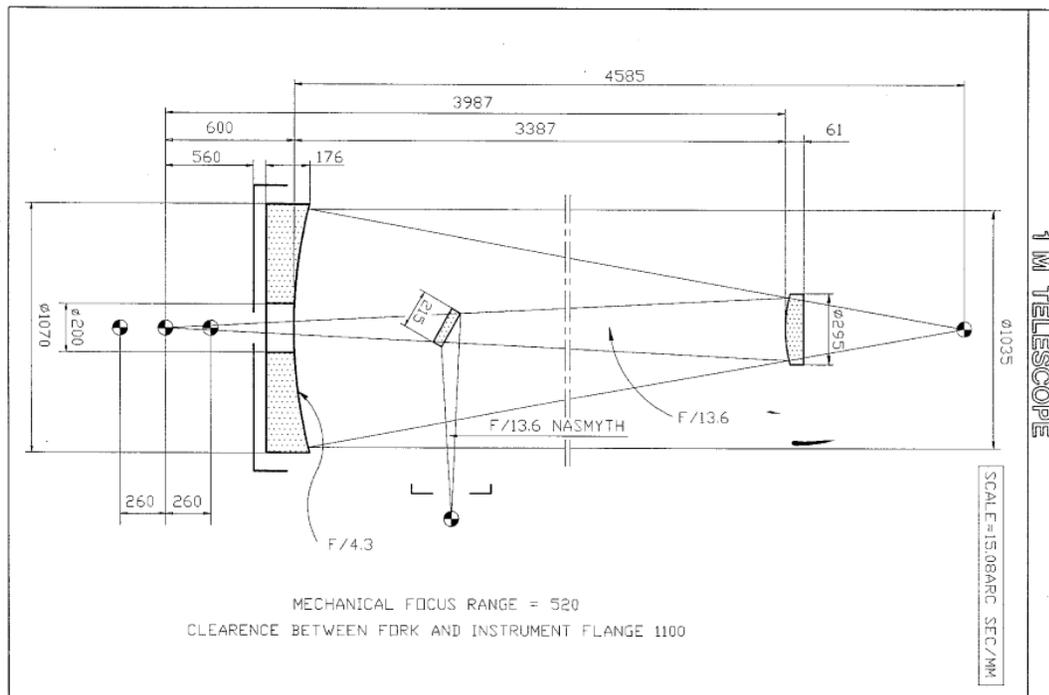


Figura 2.1 Telescopio ESO 1 metro. Se destacan las principales características, sus dimensiones mecánicas y datos útiles.

El instrumento actualmente instalado en este telescopio es el espectrógrafo de alta resolución FIDEOS (*Fiber Dual Echelle Optical Spectrograph*) (Vanzi et al., 2018). En la próxima subsección serán detalladas sus características.

### **2.1.2. Espectrógrafo FIDEOS**

FIDEOS es un espectrógrafo *echelle* de alta resolución *bench mounted* y *fiber-feed*, desarrollado por el Centro de Astro-Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica de Chile. Este instrumento es el sucesor del primer y exitoso espectrógrafo desarrollado por el centro, PUCHEROS (*Pontificia Universidad Católica High Echelle Resolution Optical Spectrograph*) (Vanzi et al., 2012). La Tabla 2.1 muestra las principales características de este instrumento. El principal objetivo de este espectrógrafo es la búsqueda de planetas extrasolares usando el método de velocidad radial.

La configuración óptica utilizada en este instrumento está basada en el diseño óptico de PUCHEROS, llamado *quasi-Littrow*. Este tipo de configuración es simple y ha sido utilizada en variados instrumentos, de baja o alta resolución. La Figura 2.2 muestra los diseños óptico y mecánico del instrumento, donde es posible notar la configuración establecida.

El instrumento presenta tres secciones que trabajan en conjunto para poder analizar la luz del objeto observado. La sección principal corresponde al espectrógrafo como tal, una segunda parte corresponde a la Unidad de Calibración donde se sitúan las lámparas de calibración y una última parte correspondiente a la Interfaz Telescopio-Instrumento donde se ubica la fibra que toma la luz del telescopio, llamada fibra de ciencia. En la Figura 2.3 es posible notar la disposición de los tres módulos del instrumento completo.

Tabla 2.1 Principales características de FIDEOS

Telescopio	ESO 1 metro, La Silla, Chile
Apertura en el cielo	1.87 arcmin <sup>2</sup>
Número de fibras ópticas	2, ciencia y calibración
Diámetro de fibra	50 $\mu\text{m}$
Resolución espectral (promedio)	42,000
Rango espectral	400 – 700 $\eta\text{m}$
Órdenes	62 – 104
Magnitud límite	$v=11$
Detector	FLI-PL230, 2kx2k, 15 $\mu\text{m}$
<i>Sampling</i> espectral con <i>slicer</i>	2.6 píxeles

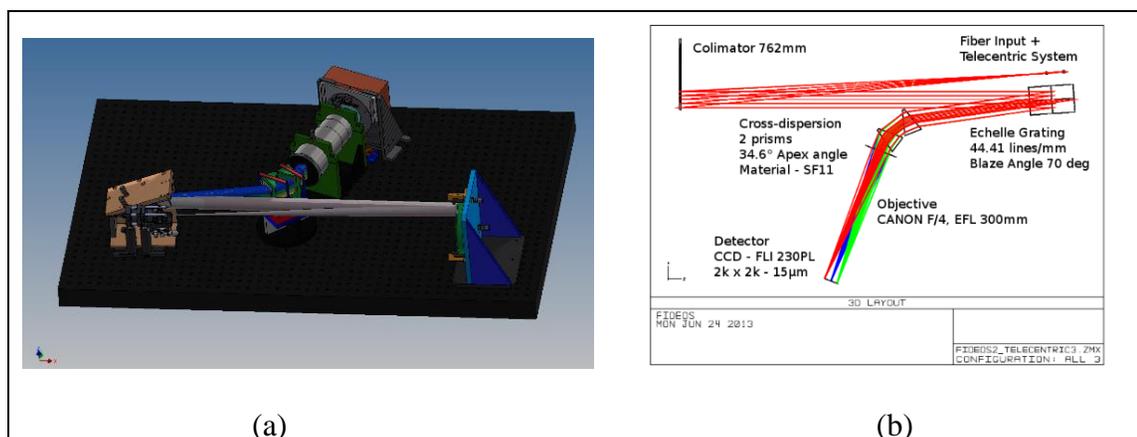


Figura 2.2 Diseños óptico y mecánico del espectrógrafo FIDEOS. En ambos diseños “a” y “b” es posible ver cada componente que conforma el instrumento.

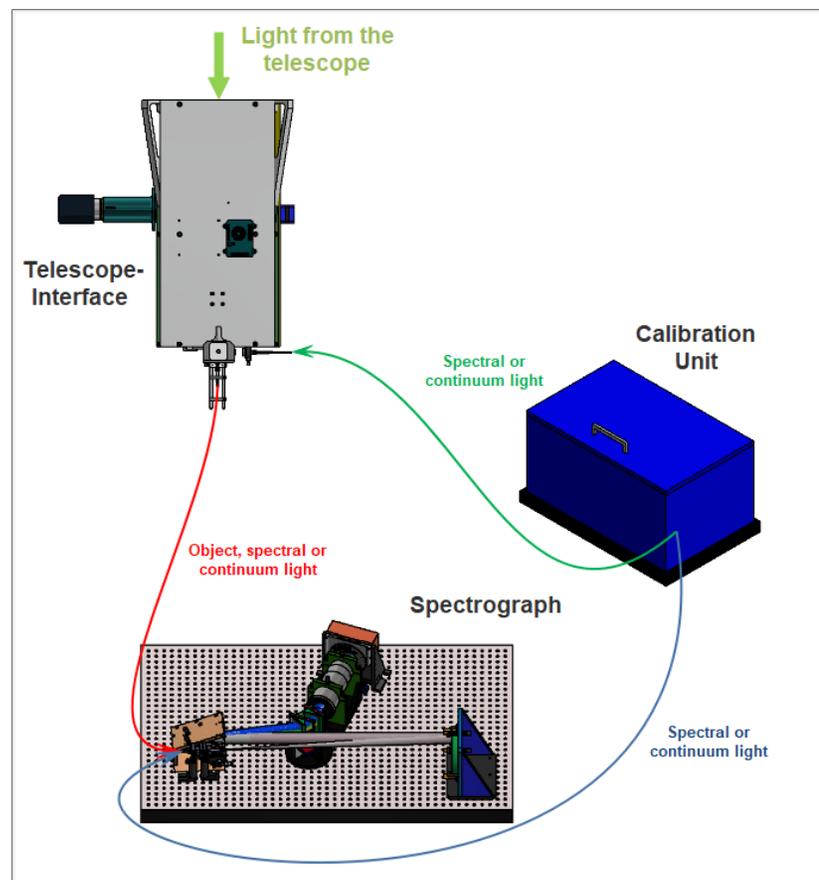


Figura 2.3 Disposición de FIDEOS. Dibujo general que muestra los tres módulos del instrumento y su conexión mediante fibras.

#### 2.1.2.1. Interfaz Telescopio-Instrumento

La Interfaz Telescopio-Instrumento (de aquí en adelante Interfaz) es el segmento del instrumento que está en contacto directo con el telescopio, instalado en el *Front End*, siendo el link entre ambos. Aquí es donde la fibra de ciencia es instalada y capta la luz proveniente de las estrellas.

La luz del objeto, proveniente del telescopio, atraviesa toda la interfaz llegando a un *pinhole*, situado en el foco del telescopio, de un diámetro de apertura de  $125\ \mu\text{m}$ . Posterior al *pinhole* se encuentra un pequeño sistema óptico que toma la imagen formada por éste y la convierte a imagen de menor tamaño ( $50\ \mu\text{m}$ ) capaz de ingresar a la fibra óptica de  $50$

$\mu\text{m}$  de diámetro. La fibra está sujeta en una montura de alta precisión con ajuste fino en los ejes X e Y, para un óptimo alineamiento.

El diseño mecánico de esta estructura fue realizada por (Flores, 2014) y la última versión del modelo puede observarse en la Figura 2.4. El diseño buscaba rigidez en la estructura con el objeto de poder soportar todos los elementos opto-mecánicos interiores y mantenerlos en las posiciones definidas según el diseño óptico.

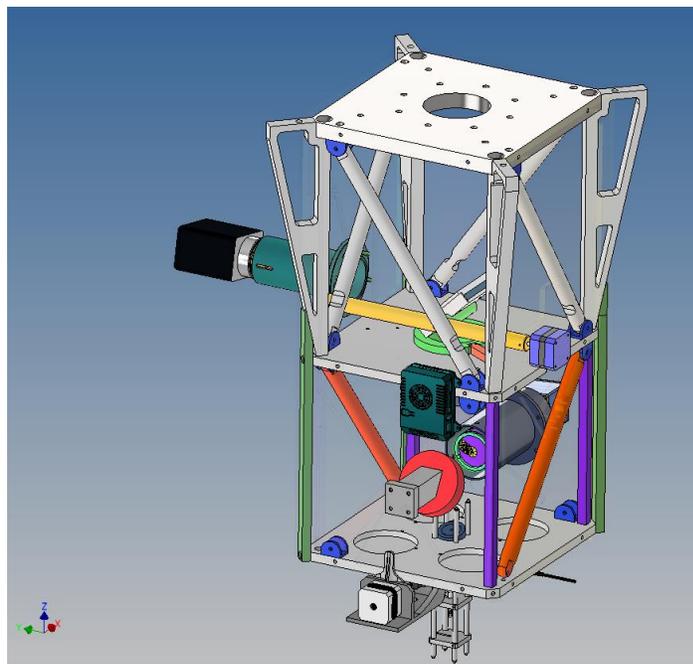


Figura 2.4 Diseño mecánico de la Interfaz Telescopio-Instrumento.

En la Figura 2.4 es posible notar los elementos opto-mecánicos al interior de la Interfaz que permiten redirigir la luz, ya sea a una cámara externa u otro sistema (a la mitad de la primera sección desde arriba hacia abajo) o reflejar la imagen formada en el espejo del *pinhole* a la cámara de adquisición con el fin de guiar el movimiento del telescopio y centrar la imagen de la estrella en el *pinhole*.

## 2.2. Problema

La Interfaz, como fue mencionado anteriormente, es la estructura mecánica que sujeta la fibra en la posición requerida para que la luz ingrese en ella apropiadamente. Cualquier efecto adverso sobre ella conllevará un desplazamiento o inclinación del eje óptico de la fibra respecto al eje del telescopio que ocasionarán pérdidas de eficiencia. Al estar montada en el telescopio, que está en contacto directo con el medioambiente, será susceptible a diversos fenómenos como vibraciones aleatorias del domo, cambios de temperatura del ambiente, viento, flexión por gravedad, entre otros (Bayar, 1979). De esta manera, el problema consiste en lograr obtener una eficiencia como mínimo de 95% en el ingreso de la luz en el *pinhole*, sobrellevando las complicaciones medioambientales previamente nombradas.

Considerando la gráfica mostrada en la Figura 1.3 y tomando el caso de FIDEOS, se genera otra gráfica, que muestra valores típicos de *seeing* para el observatorio La Silla y la eficiencia que se presenta para diferentes valores de descentramiento de la proyección de la estrella en el plano focal (ver Figura 2.5). La situación es la siguiente:

Tamaño del *pinhole* proyectado al cielo: 1.88 arco-segundos.

Valores de *seeing* típicos en La Silla:  $1'' \leq \text{seeing} \leq 2''$

Valor de desplazamiento máximo: 0.5" para un valor de *seeing* de 1" y una eficiencia de 97%. Esto se proyecta en el plano focal con un valor de 33.3 micrones.

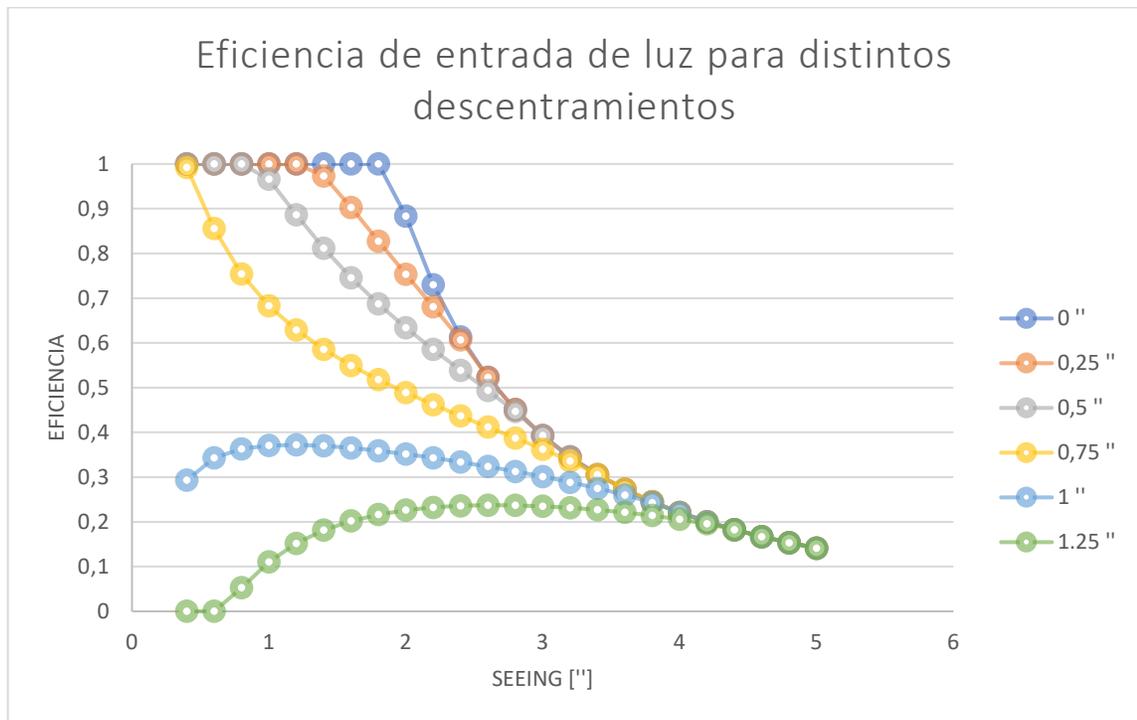


Figura 2.5 Gráfica eficiencia vs seeing caso FIDEOS.

Cabe destacar que el telescopio, al seguir la estrella moviéndose en el cielo mediante su sistema de guiaje, permite compensar los desplazamientos presentados por la imagen proyectada de la estrella en el plano focal, controlando el ingreso eficiente de la luz en el *pinhole*, pero no así en la fibra, que es montada posterior al foco en una posición en la que el sistema de guiaje no puede compensar los desplazamientos de la imagen formada en tal lugar. Entonces, será necesario realizar un análisis de la estructura con el fin de dilucidar su comportamiento frente a las solicitaciones ambientales anteriormente descritas, particularmente la gravedad.

Similar al problema de inyección de la luz del telescopio a la fibra de ciencia, se encuentra el problema de la inyección adecuada de la luz que proviene de la unidad de calibración hacia la fibra de ciencia, en donde el alineamiento de ambos sistemas ópticos es crucial y cualquier desplazamiento, ya sea del sistema óptico de la fibra de ciencia o del sistema de la fibra de calibración (que está sujeta a la última cara de la Interfaz) llevarán a pérdidas de luz.

## 2.3. Soluciones

Con el fin de sobrellevar el problema encontrado en la Interfaz, se realiza, de forma inicial, un análisis numérico al diseño de la estructura con el objetivo de obtener el máximo desplazamiento que podría presentar bajo ciertas circunstancias dadas en el telescopio. En segundo lugar, habiendo corroborado mediante el análisis el comportamiento de la estructura, se fabrica y se testea instalada en el telescopio utilizando la técnica de fotogrametría. Estos test proveen información acerca de su funcionamiento en la realidad.

### 2.3.1. Análisis FEA

Como un primer acercamiento, en (Flores, 2014) es simulado el comportamiento de la Interfaz bajo el efecto de la gravedad para una posición de  $0^\circ$  referido al piso del domo. Esta simulación consideraba la estructura sin las paredes, pero sí agregaba el peso de éstas como una carga. Así mismo, como otra carga, se añadió el peso de futuros elementos. Los resultados obtenidos pueden observarse en Figura 2.6.

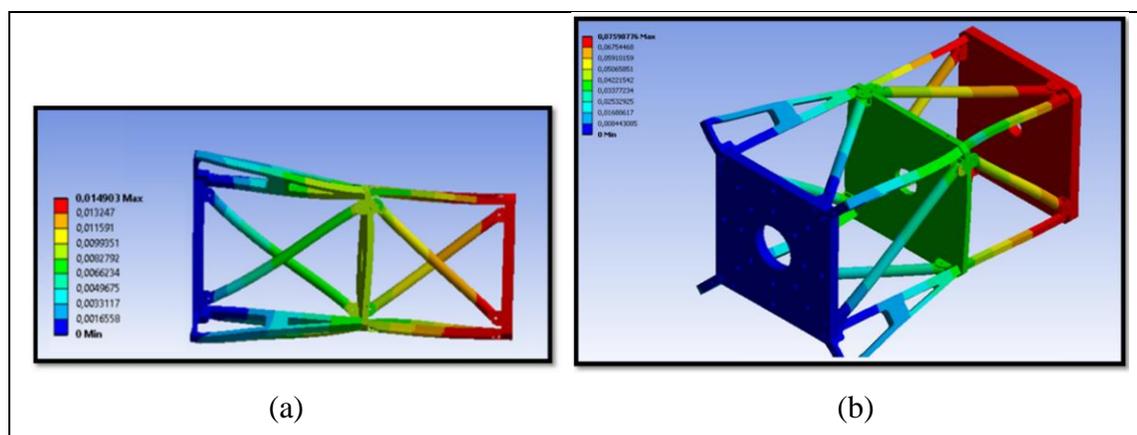


Figura 2.6 Desplazamiento de la Interfaz Telescopio-Instrumento. La imagen “a” muestra el máximo desplazamiento mostrado por la interfaz y su propio peso, igual a  $14.9 \mu\text{m}$ , mientras que en “b” se observa en máximo desplazamiento después de agregar la carga de los próximos componentes, con un valor de  $75.9 \mu\text{m}$ .

Las figuras “a” y “b” de la Figura 2.6, muestran el comportamiento de la Interfaz bajo la carga de gravedad y también bajo la inclusión del peso de las paredes protectoras y próximos componentes opto-mecánicos, presentando como máximo desplazamiento 76 micrones en la última cara de la Interfaz.

Esta simulación, como fue mencionado anteriormente, se realizó como primer acercamiento y necesariamente debe realizarse otra, considerando parámetros del telescopio, de las conexiones entre componentes, condiciones de borde en el modelo y nueva configuración de la interfaz. En efecto, el análisis consideró una inclinación de  $0^\circ$  grados respecto al piso del domo, lo que no es real puesto que la máxima inclinación permitida por el Sistema de Control del Telescopio (TCS en inglés) es  $15^\circ$ . La conexión entre componentes no se definió adecuadamente, ya que fueron estimadas todas las conexiones como fijas. No se agregaron las paredes al modelo, desestimando la rigidez que podrían proveerle a la estructura. El nuevo diseño adaptado para la nueva simulación es mostrado en la Figura 2.7.

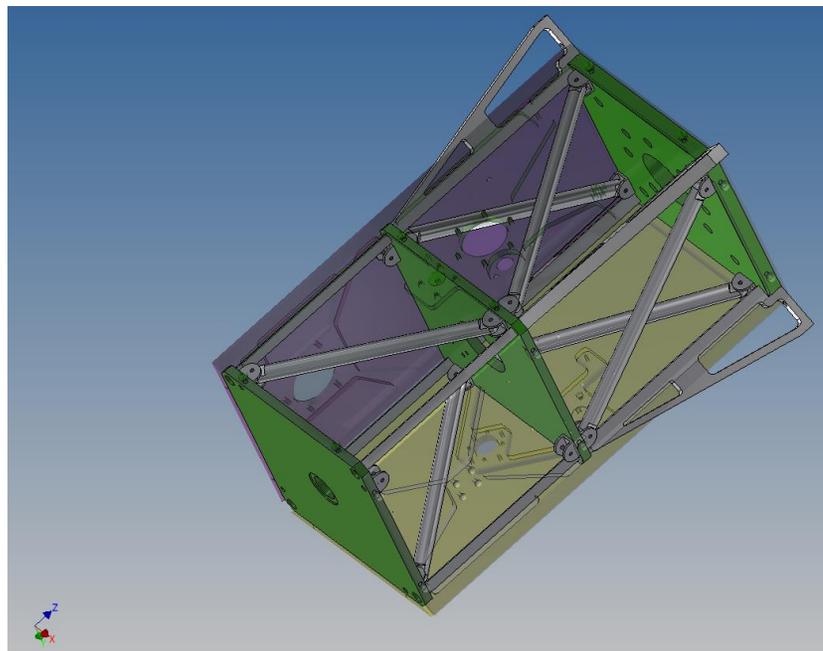


Figura 2.7 Diseño renovado de la Interfaz Telescopio-Instrumento. Pueden observarse las paredes traslúcidas en los lados de la estructura.

La nueva simulación fue realizada con los siguientes parámetros:

- **Materiales:**
  - Cuerpo principal: Aluminio 6061- O
  - Conexiones: Acero 1020
- **Tipo de análisis:** Estático lineal.
- **Malla:** Sólida con elementos de tamaño 10 mm
- **Cargas:** Gravedad + 2 cargas de 75 N (contrapesos y piezas restantes) situados en los vértices extremos
- **Restricciones:** Fijo en los 8 orificios sujetos al telescopio.

Las Figura 2.8 y Figura 2.9 muestran los resultados de esta nueva simulación.

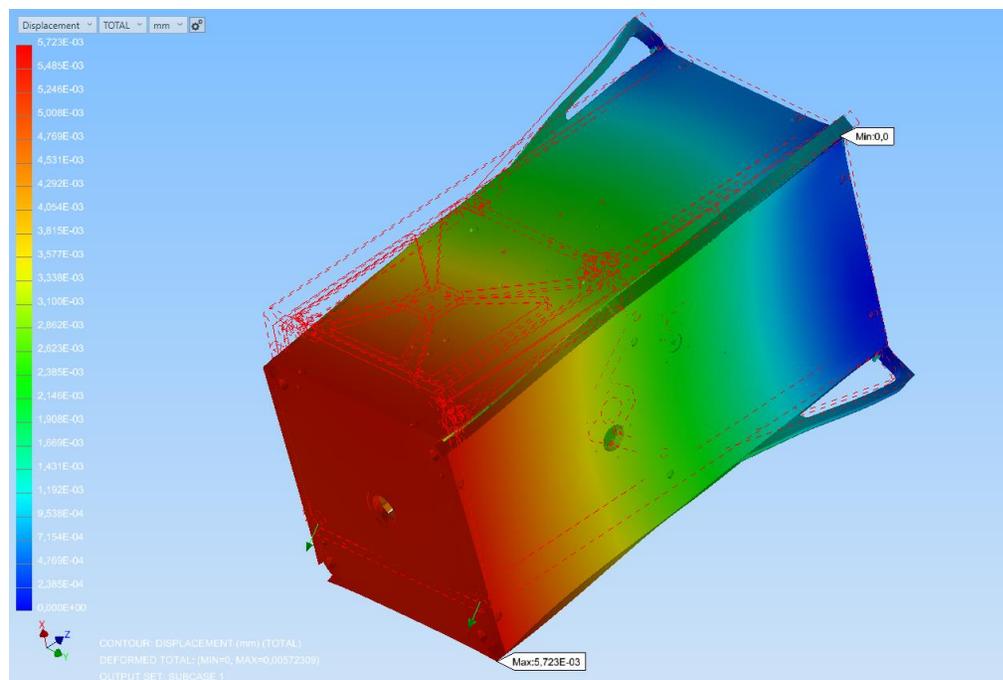


Figura 2.8 Desplazamiento presentado en la Interfaz para una inclinación de  $45^\circ$  y gravedad + 150 N. El máximo desplazamiento corresponde a  $5.74 \mu\text{m}$  al extremo de la interfaz.

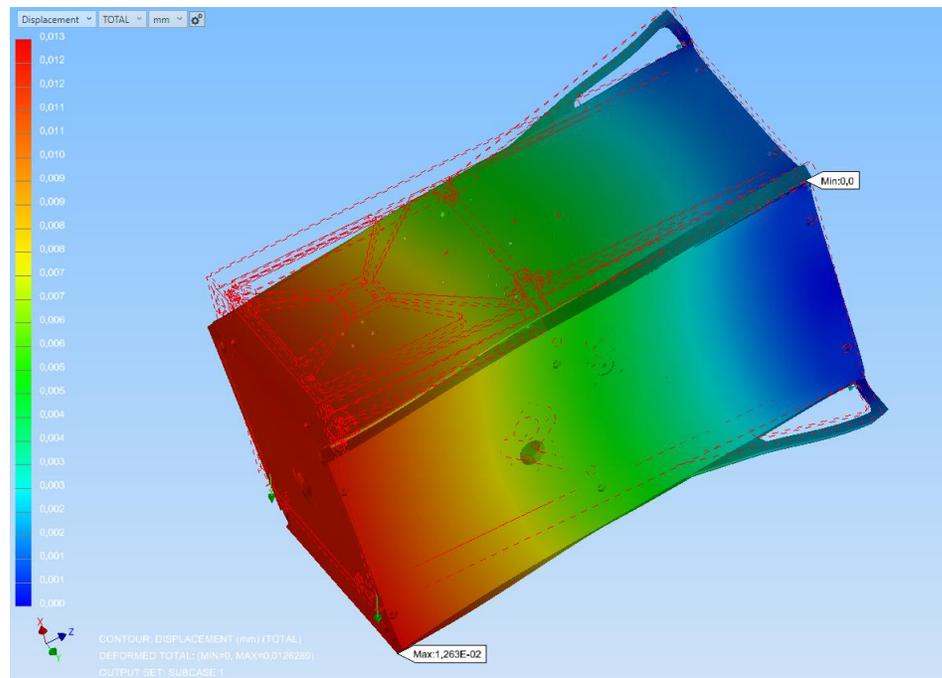


Figura 2.9 Desplazamiento presentado en la Interfaz para  $15^\circ$  y gravedad + 150 N. El máximo desplazamiento corresponde a  $13 \mu\text{m}$  al extremo de la interfaz.

Los resultados obtenidos en esta simulación corroboran la suposición de que las paredes rigidizan la estructura. El resultado es positivo y aún mejor que la simulación previa, por lo que la estructura demuestra su buen comportamiento frente a la sollicitación de gravedad más la carga extra. Aun así, con el objeto de acercar un poco más el cálculo numérico a la realidad, se realiza una simulación “extrema” que considera conexiones holgadas de las paredes a la estructura, como también en el “esqueleto” de la Interfaz, el resultado puede verse en la Figura 2.10.

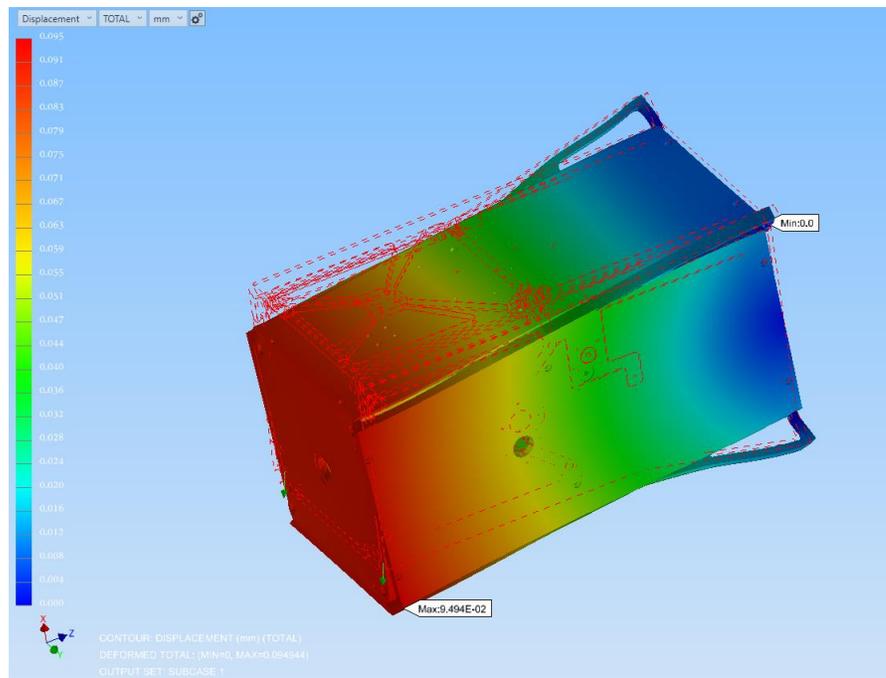


Figura 2.10 Desplazamiento presentado en la Interfaz para  $15^\circ$ , gravedad + 150 N y conexiones holgadas. El máximo desplazamiento corresponde a  $95 \mu\text{m}$  al extremo de la interfaz.

### 2.3.2. Fotogrametría de rango cercano

Para corroborar el máximo desplazamiento presentado en la Interfaz, se propone la utilización de la tecnología de fotogrametría, específicamente fotogrametría de rango cercano (Schenk, 2005). Ésta ha sido utilizada como método de medición de desplazamientos y deformación en estructuras opto-mecánicas, gracias a su versatilidad y flexibilidad de uso (Jiang, Yang, Xu, & Yu, 2013; Pappa, Giersch, & Quagliaroli, 2001) y también ha sido empleada para contrastar los resultados numéricos obtenidos en un análisis por elementos finitos (Huang, Raffin, Chen, Altamirano, & Oshiro, 2008). De esta forma, con la utilización de esta técnica, será posible corroborar los resultados numéricos obtenidos previamente.

Para la realización de estas mediciones se utiliza un producto comercial disponible llamado V-Stars de GSI (*Geodetic System Inc*).

### 2.3.2.1. Herramientas

El modelo de V-Stars utilizado es la versión *Platinum N*. El equipo posee una cámara principal Nikon modelo D600, tres segmentos de barra de fibra de carbono usada como barra de escala de medición o *scale bar* (para este caso se usa solo un segmento debido al tamaño de cada uno de ellos), targets reflectivos de 12 mm de diámetro, *coded targets* compuestos de algunos *targets* de 3 mm dispuestos en posiciones específicas para calibrar la medición y, por último, posee el software de procesamiento y análisis de imágenes V-Stars v. 4.7(“V-STARS/N,” n.d.).

### 2.3.2.2. Procedimiento de medición

En primera instancia se instalan 4 targets en la base donde se sujeta la Interfaz para asignarlos como puntos de referencia para cada estado. En segundo lugar, se distribuyen por cara 9 targets y 2 *coded targets*: tres targets por cada piso de la estructura y los *coded targets* en la mitad entre ellos (a lo largo de las paredes). Posterior a la instalación de los targets en las caras y con el fin de analizar adecuadamente el desplazamiento en la última sección de la Interfaz (donde se produce el mayor desplazamiento), se instalan 8 targets y 2 *coded targets* distribuidos a lo largo de los lados de la cara. Posterior a estos últimos targets, se instalan 2 más sobre el sistema que mueve el prisma de calibración (prisma que permite el cambio de dirección del haz de luz entrante), con el fin de notar su rigidez respecto a la Interfaz. Por último, la *scale bar* se instala usando huinchas plásticas sujetas firmemente tocando la base donde se monta la estructura (*Front End*). Parte de la configuración total puede observarse en la Figura 2.11.

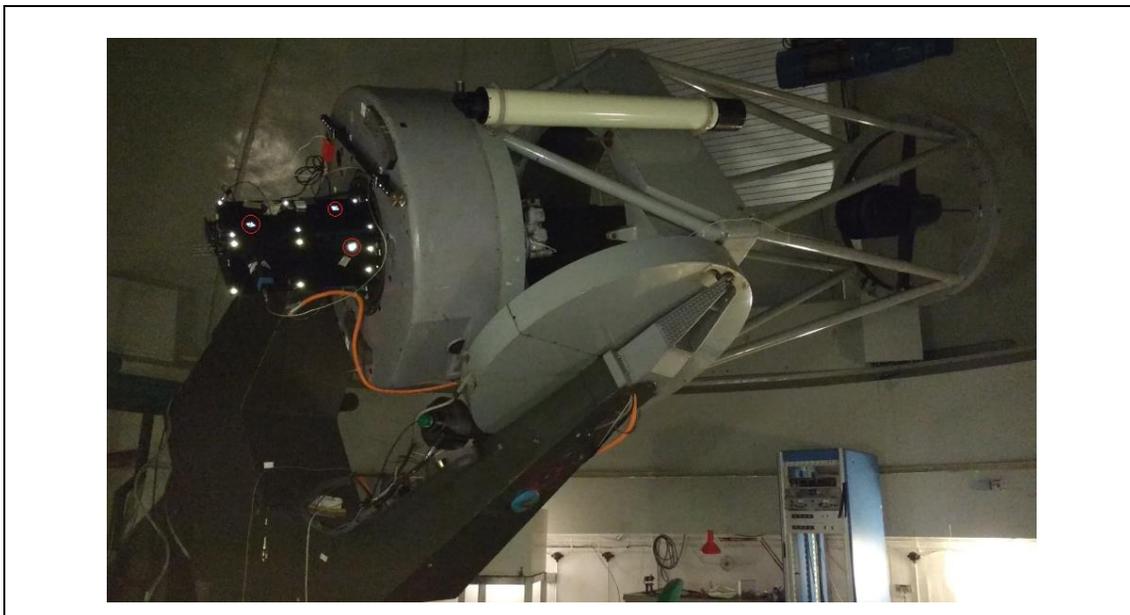


Figura 2.11 *Targets, coded targets y scale bar* en la Interfaz Telescopio-Instrumento. Los círculos rojos destacan los *coded targets*, los *targets* corresponden a los puntos reflectantes sin círculo rojo y la *scale bar* se observa transversal en el *Front End* del telescopio.

Ya teniendo el cuerpo cubierto de targets, se procede a hacer aproximadamente 70 fotografías para cada caso presente, desde distintos ángulos y posiciones cubriendo completamente el área del sistema analizado. Los casos fueron: zenit,  $45^\circ$  referidos al plano del domo y, por último, telescopio tocando el límite de carrera del TCS a  $15^\circ$ . Cada uno de ellos con y sin la inclusión del peso extra. El peso incluido correspondía a dos piezas de acero de 6 kilogramos cada una, que eran usadas anteriormente como contrapesos en el telescopio. Cada una de ellas se instaló colgando de dos pernos al final de la Interfaz (ver Figura 2.12). Para realizar el procesamiento de las imágenes fueron transferidos todos los casos al software V-Stars 4.7 y creados diferentes proyectos para cada uno.



Figura 2.12 Pesos colgando de la Interfaz Telescopio-Instrumento. Pueden apreciarse los puntos (dos pernos) donde los sobrepesos son sostenidos.

### 2.3.2.3. Descripción del análisis de datos

Teniendo los datos previamente cargados, se corre la rutina de auto-reconocimiento de puntos, que ubica *targets*, *coded targets* y *scale bars* en el espacio de trabajo captado en cada imagen. La función de reconocimiento de *targets* considera ciertos parámetros de selección, como forma del *target*, contraste B/N entre los *targets* y el ambiente circundante y cantidad de luz (cuentas) de cada *target*, debido a esto muchos puntos parásitos brillantes se reconocen y también muchos otros *targets* no se reconocen por no cumplir con alguno de tales parámetros. Por tal razón, se debe analizar cada imagen por separado agregando puntos manualmente y borrando otros no correspondientes. Con este filtro manual, se permite mejorar la exactitud de la medición y, además, incluir puntos nuevos para analizar. La Figura 2.13 muestra las ventanas desplegadas tras el proceso de auto-reconocimiento, donde es posible observar la exactitud obtenida en cada eje coordenado y el promedio de la medición. Posterior a este proceso se genera automáticamente una nube de puntos 3D y así mismo una lista de las posiciones de cada uno de ellos, ya sean *targets*, *coded targets* o la *scale bar*. La Figura 2.14 muestra una nube de puntos obtenida desde el software V-

Stars y traspasada al software Autodesk Inventor (“Inventor Professional Student Version,” n.d.) para un manejo más fácil de ésta. Cabe destacar que el software entrega un sistema de coordenadas automático y necesariamente se debe cambiar a uno según las necesidades del usuario. Al cambiar el eje coordenado, cambian las coordenadas de cada punto. Como última etapa del proceso de análisis de datos, se exportan los puntos obtenidos en formatos genéricos. Para este caso se exportan en formato 3D (.iges) y se exporta la lista en formato de texto (.txt). El primero se utiliza para su manejo en el software Autodesk Inventor y la lista se utiliza para el software CloudCompare v2.9.1 (“Cloud Compare,” n.d.) y Matlab R2017a (“MatLab R2017a,” n.d.).

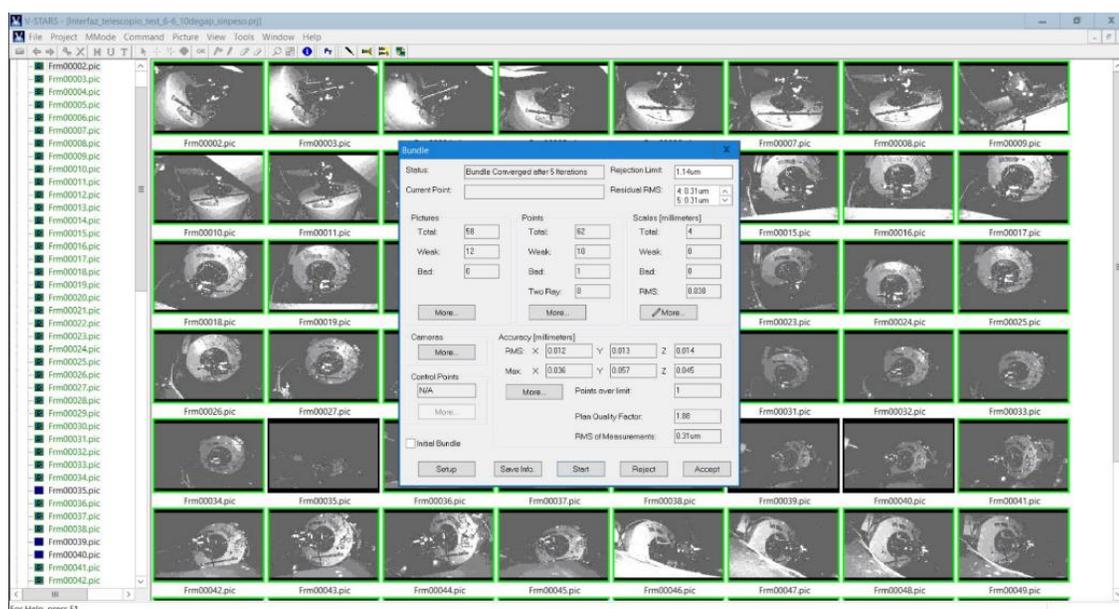


Figura 2.13 Interfaz de usuario V-Stars. En la ventana *Bundle* es posible observar los valores de *accuracy* (exactitud) del proceso de *rejection*, los cuales bordean las decenas de micrones como promedio en cada eje. Así mismo, se nota que existen puntos con un valor mucho mayor, los cuales tendrán que ser eliminados para mejorar la exactitud de la medición.



Figura 2.14 Nube de puntos generada para la Interfaz Telescopio-Instrumento. Se visualiza en el software Autodesk Inventor, donde es posible mover y analizar punto a punto sin intervenir la configuración adquirida en V-Stars.

## 2.4. Resultados

Los resultados entregados por el software V-Stars se trabajan en dos softwares apropiados para el manejo de nubes de puntos y creación de vectores de desplazamiento.

El primero en ser usado es el software de acceso libre CloudCompare v 2.9.1, diseñado y optimizado para la comparación de nubes de puntos y mallas. Provee de variadas herramientas para el manejo de las mallas y visualización de estas. En este programa se comparan el caso de referencia con los casos en  $45^\circ$  con peso y  $15^\circ$  con peso.

De manera similar, se utiliza el software de herramientas matemáticas Matlab R2017a, en el cual se comparan las matrices generadas por los puntos 3D de cada caso y con la función *quiver3* (que utiliza las coordenadas iniciales y la diferencia entre los ejes X, Y y Z entre los puntos iniciales y finales) se generan los vectores normalizados de desplazamiento entre un estado y otro.

### 2.4.1. 45° de inclinación

Haciendo uso del software CloudCompare se comparan, en primera instancia, los valores obtenidos para la posición zenit sin peso y para la posición de 45° con peso. Para esto, se selecciona la posición zenit como referencia y se corre la función de comparación entre las dos nubes de puntos, entregando un resultado que muestra los módulos de cada vector desplazamiento. La Figura 2.15 muestra el resultado de la comparación, en donde el color de cada punto representa el valor desplazamiento, siendo rojo el máximo obtenido.

Para conocer y corroborar el comportamiento esperado de deflexión en la estructura se genera un gráfico en Matlab que muestra los vectores normalizados de desplazamiento entre los dos casos (ver Figura 2.16).

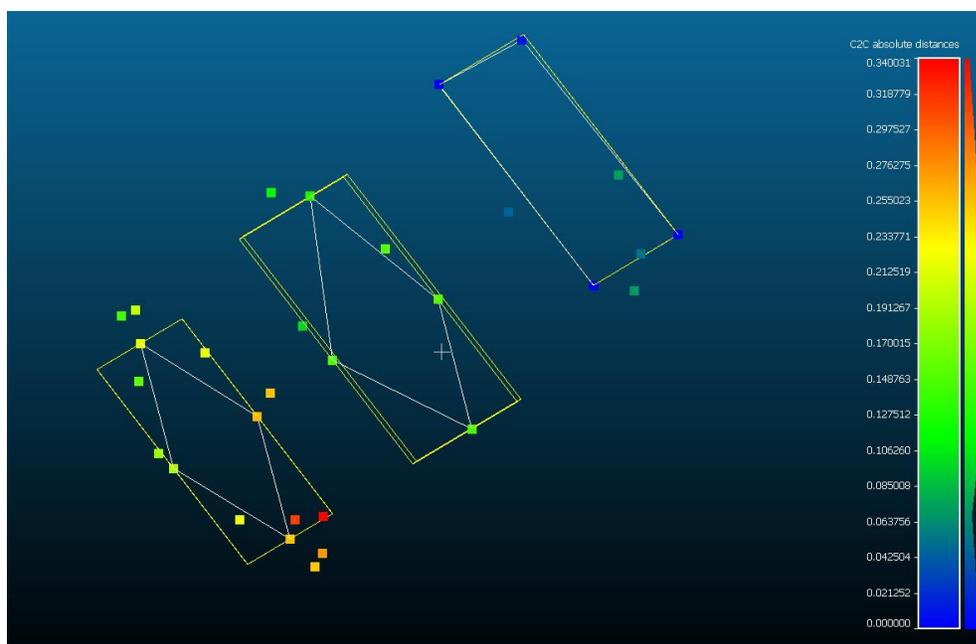


Figura 2.15 Desplazamiento obtenido para 45° y peso incluido. El máximo valor encontrado es de 340  $\mu\text{m}$ , presentado solo en un punto, al extremo de un lado de la cara final. El valor RMS de la última cara corresponde a 221  $\mu\text{m}$ .

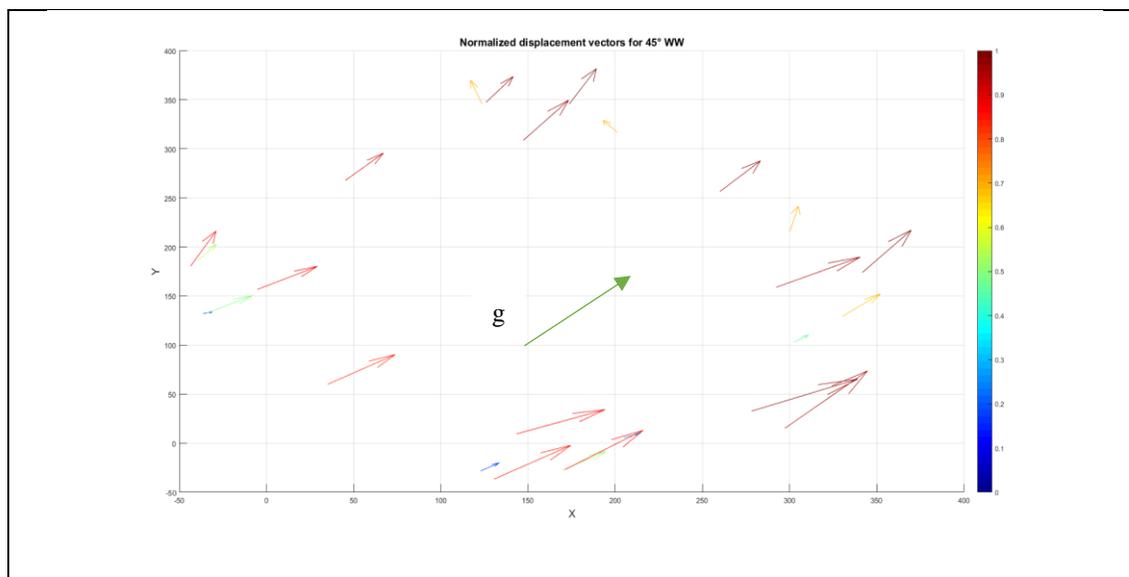


Figura 2.16 Vectores normalizados de desplazamiento para  $45^\circ$  con peso incluido. Los vectores con mayor dimensión corresponden a los puntos ubicados en la última cara de la interfaz. Es posible ver que los desplazamientos siguen al vector de la gravedad.

Los errores sistemáticos estimados entregados por V-Stars, RMS, para cada eje, son expuestos en Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Errores sistemáticos de cada eje entregados por V-Stars para medición en  $45^\circ$

$\Delta x$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\Delta y$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\Delta z$ [ $\mu\text{m}$ ]	Promedio [ $\mu\text{m}$ ]
27	27	28	27

Comparando los valores de errores entregados por V-Stars para cada eje y en promedio, se observa que son un orden de magnitud menor a los calculados por CloudCompare, por lo que los valores de desplazamiento medidos son significativos y no están dominados por errores del sistema de medición.

Es preciso denotar que los vectores expuestos en la Figura 2.16 y Figura 2.17 muestran una dirección diagonal ascendente en el plano X-Y, debido a que los puntos elegidos como referencia quedaron situados a la mitad del plano donde estaban los demás *targets*. De la misma forma, cabe destacar que la gravedad actuó en esa dirección.

Los valores exhibidos en la Figura 2.15 son mayores a los obtenidos para el caso del análisis de elementos finitos y muestran que el máximo valor no es homogéneo en la última cara, sino que se presenta solamente en un sector. El promedio RMS de valores de tal sector es de 221 micrones, que es aproximadamente 40 veces mayor al presentado en el análisis FEA ideal. Aun así, el comportamiento de deflexión de la interfaz responde como debería ser, máximo al extremo y mínimo en su punto fijo.

#### 2.4.2. 15° de inclinación

Al igual que para el caso de 45°, se realiza el mismo procedimiento: comparación entre la referencia Zenit sin peso con la nube generada para los 15° con peso. La Figura 2.17 y la Figura 2.18 muestran los resultados obtenidos para este caso.

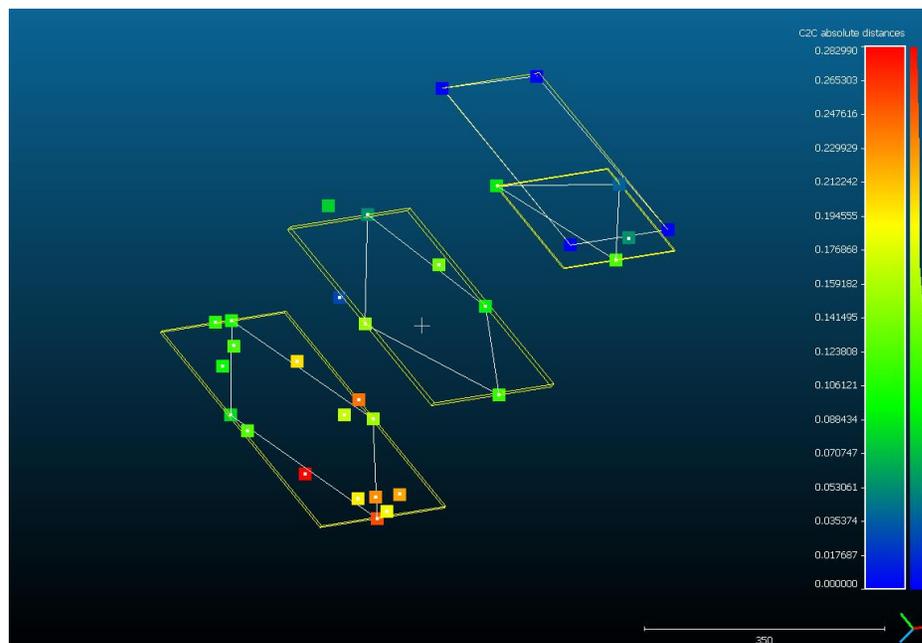


Figura 2.17 Desplazamiento obtenido para 15° y peso incluido. El máximo valor encontrado corresponde a 283  $\mu\text{m}$  encontrado en un solo punto. El valor RMS de la última cara corresponde a 167  $\mu\text{m}$ .

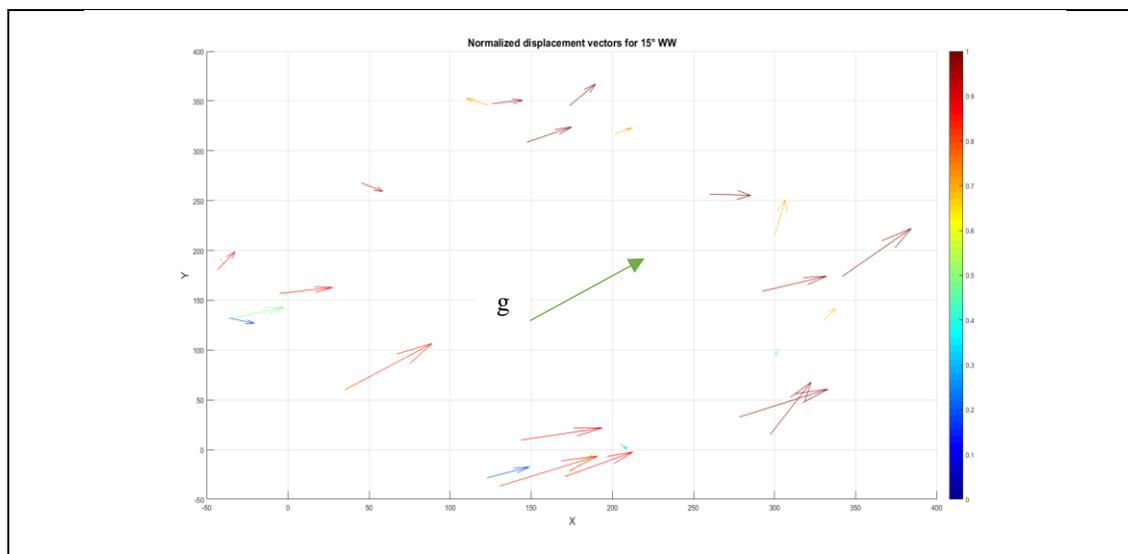


Figura 2.18 Vectores normalizados de desplazamiento para  $15^\circ$  con peso incluido. De la misma forma que para  $45^\circ$ , los vectores con mayor dimensión corresponden los situados en la última cara y siguen al vector de la gravedad.

Los resultados para este caso difieren bastante del caso a  $45^\circ$ , ya que es esperable una mayor deflexión a una menor inclinación y no inversamente. El valor RMS de los desplazamientos de la última cara, sin considerar el punto rojo, es de 167 micrones, menor al caso de  $45^\circ$ . En comparación con el análisis FEA ideal, este resultado es 13 veces mayor y para el caso FEA realista este valor es 1.8 veces mayor. Los errores sistemáticos de la medición son tabulados en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Errores sistemáticos de cada eje entregados por V-Stars para medición en  $15^\circ$

$\Delta x$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\Delta y$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\Delta z$ [ $\mu\text{m}$ ]	Promedio [ $\mu\text{m}$ ]
25	27	28	27

Al igual que para la medición de  $45^\circ$ , los valores de errores entregados por V-Stars son del orden de veintenas de micrones y no afectan mayoritariamente los valores de desplazamiento entregados por CloudCompare. Aun así, estos valores podrían considerarse en la diferencia existente entre el caso  $45^\circ$  y este caso.

### 2.4.3. Test de laboratorio

Con el objetivo de entender el comportamiento y los resultados obtenidos para la Interfaz montada en el telescopio, se agregan los resultados de un análisis de la estructura realizado antes de la instalación de esta en el observatorio. Si bien la metodología que se usó es la misma que se siguió en el telescopio, no se consideraron los mismos ángulos, cargas y estructura. La estructura estaba sin sus paredes protectoras, el ángulo a analizado fue de  $21^\circ$  y la carga adicional incluida fue de 10 kg, distribuida en dos contra pesos de 5 kg cada uno sujetos a la última “cara” de la Interfaz. Los resultados para este caso pueden observarse en la Figura 2.19 y Figura 2.20.

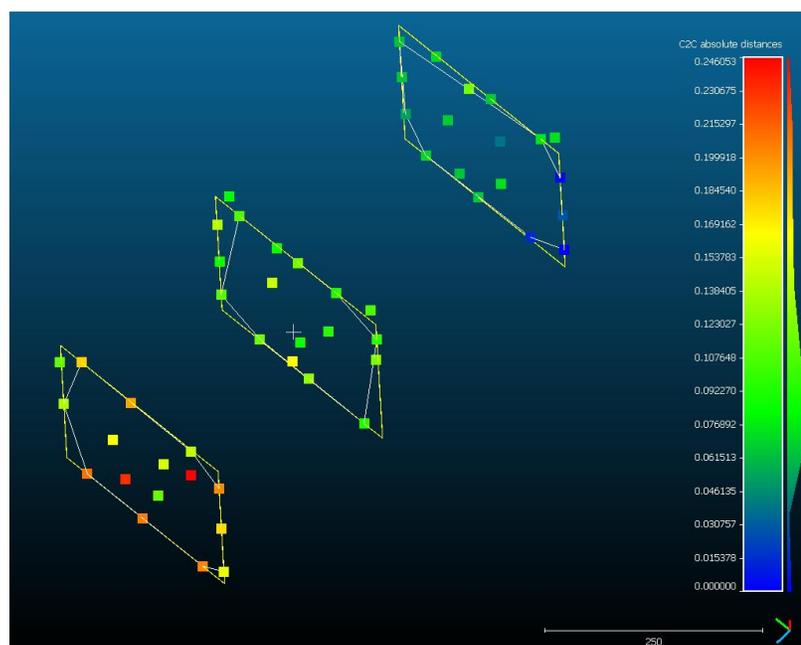


Figura 2.19 Desplazamiento obtenido para  $21^\circ$  en laboratorio. El máximo valor mostrado es de 246  $\mu\text{m}$  en un punto central de la última cara de la interfaz.

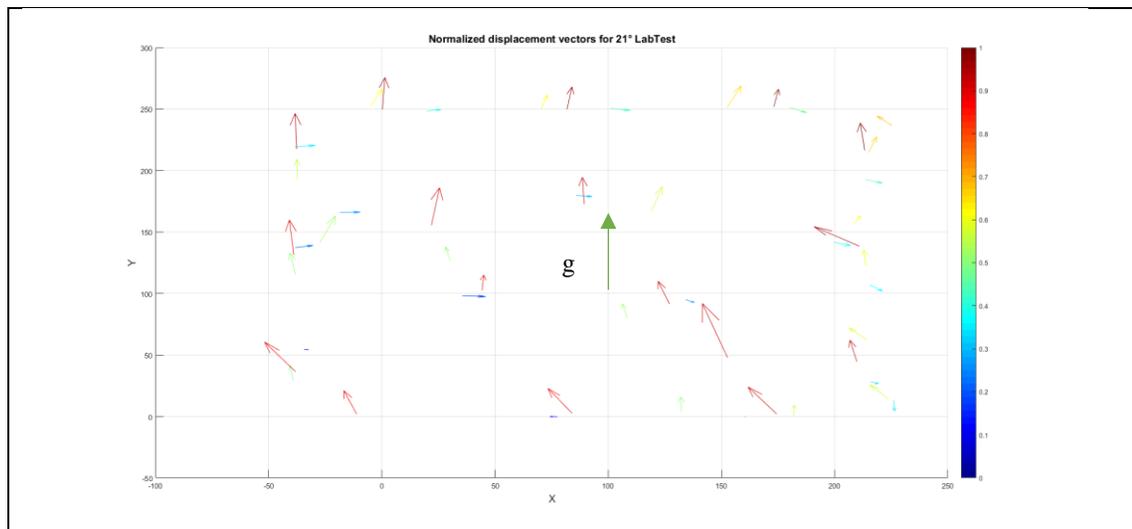


Figura 2.20 Vectores normalizados de desplazamiento para  $21^\circ$  en laboratorio. La mayoría de los vectores sigue la dirección del vector de la gravedad.

A diferencia de los gráficos de los test realizados en el telescopio, el gráfico de los vectores normalizados del test de laboratorio muestra una coincidencia en la dirección de la carga y el plano X-Y, en donde, además, es posible notar que la gravedad actuó en la dirección Y+.

Si se comparan las tres mediciones realizadas, se advierte que este caso presenta el menor desplazamiento en la última cara, lo que es completamente contrario a la expectativa, puesto que la configuración no incluye las paredes que proveen firmeza y es agregada una carga de 10 Kg, cercana a los 12 Kg usados en el telescopio.

A modo de análisis general, se observa que las mediciones realizadas con el sistema GSI presentan resultados erráticos que podrían deberse a desplazamientos a causa de contactos débiles, movimientos de cada cara apartados del comportamiento de toda la estructura o debido a una mala medición fotogramétrica. Así mismo debe considerarse que solo se realizó una sesión de fotos para cada estado, lo que no es óptimo, ya que, con una mayor cantidad de mediciones, disminuye la incertidumbre entre ellas. Esto conlleva a considerar una remediación de la estructura bajo un ambiente de control absoluto de cada unión entre las caras y el esqueleto de la interfaz y a un mejoramiento del procedimiento de medición.

### 3. INSTALACIÓN DE N FIBRAS ÓPTICAS

En este capítulo se describe el caso particular del espectrógrafo MOONS instalado en el telescopio de 8 metros VLT, alimentado por más de mil fibras. Este caso en específico permite avanzar en el desarrollo de la técnica fotogramétrica en una situación de mayor exigencia, debido a la precisión que requiere captar con las mil fibras cada uno de los objetos en el plano focal del telescopio.

#### 3.1. Introducción

##### 3.1.1. Telescopio VLT

El conjunto VLT (*Very Large Telescope*) corresponde a 4 telescopios principales de 8.2 metros de diámetro cada uno y a 4 telescopios auxiliares de 1.8 metros de diámetro cada uno. Los cuatro telescopios mayores pueden funcionar conjuntamente, logrando tener una colección de luz equivalente a la de un telescopio de 16 metros. De la misma forma, los cuatro telescopios auxiliares o los cuatro mayores pueden combinar sus rayos de luz coherentemente para formar el VLTI (*Very Large Telescope Interferometer*).

Los telescopios principales tienen un diseño óptico del tipo *Ritchey – Chrétien*, poseen un espejo primario (M1) de 8200 mm de diámetro con una relación focal  $f/1.8$ , un espejo secundario (M2) de 940 mm de diámetro, un espejo terciario (M3) elíptico plano de 1242 x 866 mm y están montados sobre una montura Alto-Azimutal. Pueden utilizar el foco *Cassegrain*, ambos focos *Nasmyth* y también el foco *Coudé*. Para cambiar de foco entre *Cassegrain* y *Nasmyth/Coudé*, debe cambiarse la curvatura del espejo primario (utilizando óptica activa), mover el espejo elíptico y reenfocarse el espejo secundario. Para utilizar el foco *Coudé*, se instala un sistema óptico en el foco *Nasmyth* que redirige la luz proveniente de espejo terciario. Este foco se utiliza para enviar la luz para el VLTI o una combinación de modos. En la Figura 3.1 puede observarse la estructura completa de un telescopio principal.



En la Tabla 3.1 es mostrado un sumario destacando las más importantes características de este instrumento.

Este espectrógrafo será montado en uno de los dos focos *Nasmyth* del telescopio VLT. El tamaño aproximado que tendrá será de 4 metros de alto por 1.5 de ancho. El instrumento no solo consiste en ambos espectrógrafos (alta y baja resolución) sino que también incluye la Interfaz Telescopio-Instrumento, llamada *Rotating Front End* (RFE), montada directamente en uno de los focos *Nasmyth* del VLT y que gira conjuntamente al eje de declinación del telescopio. En la Figura 3.2 es posible ver el telescopio, el RFE y el espectrógrafo comparados con el tamaño aproximado de una persona.

Tabla 3.1 Parámetros instrumentales de MOONS

Telescopio	8.2 m, ESO VLT, Paranal, Chile	
Campo de vista	500 arcmin <sup>2</sup>	
Eficiencia de salida	30%	
Numero de fibras ópticas	1001	
Diámetro de fibras	150µm	
Plano focal	Circular, 0.45 m de radio.	
<b>Espectrógrafos</b>		
	Modo Media-baja resolución	Modo Alta resolución
Resolución	4000-6000	Banda RI: 9000 Banda YJ: 4000 Banda H: 20000
Longitud de onda	0.64 µm – 1.8 µm	Banda RI: 0.76 µm – 0.9 µm Banda YJ: 0.95 µm – 1.35 µm Banda H: 1.52 µm – 1.63 µm
<b>Metrología</b>		
Cámaras de metrología	12 <i>off-axis</i>	
Iluminación	Matriz de 24 Leds, <i>off-axis</i>	

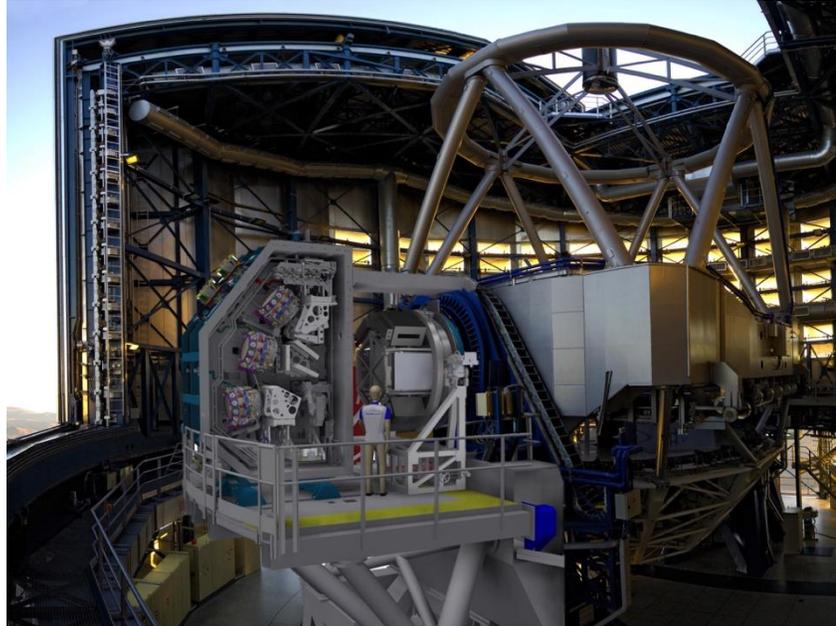


Figura 3.2 Espectrógrafo MOONS montado en el foco *Nasmyth* del telescopio. El instrumento se sitúa al extremo izquierdo, el telescopio notoriamente al lado derecho y entre ellos, al lado de la persona, el *Rotating Front End*. (Taylor et al., 2018).

### 3.1.2.1. RFE, FPU y FPA

El *Rotating Front End* (RFE) corresponde a una gran estructura mecánica diseñada para soportar las 1001 fibras que capturarán la luz estelar proveniente de al menos 1000 objetos astronómicos. Así mismo, soportará el sistema de metrología y calibración (más información en 3.1.2.2) indispensable para la observación y funcionamiento del instrumento. Como es posible de ver en la Figura 3.2, el RFE irá acoplado directamente al foco *Nasmyth* del telescopio VLT y soportado por la plataforma *Nasmyth A* o *B*.

El posicionamiento de las fibras en el plano focal se realiza a través de un sistema robótico, llamado *Fiber Positioning Unit* (FPU). El sistema está formado por el brazo (*beta arm*) que sujeta la fibra óptica y que posee pequeños targets para su reconocimiento en posición (*metrology targets*), dos motores que le proveen dos giros independientes (*alpha* y *beta motors*), el chasis que sujeta los motores (*chassis*), la tarjeta de control y toda la electrónica necesaria para su funcionamiento (*drive electronics*). La Figura 3.3 muestra los FPU en

un diseño CAD (*Computer Aided Design*), en donde se destacan todas las partes del conjunto, y algunos modelos construidos y montados en una montura adecuada para su testeo. Cada FPU será montado en una posición específica, previamente definida, en un *plate* esférico que presenta un radio de curvatura de aproximadamente 4 metros. La superficie del *plate* es curva debido a que se adapta a la forma del plano focal. Los FPU y sumado al algoritmo de movimiento de cada uno de ellos, permitirán cubrir completamente el plano focal, formando así lo que se llama el *Focal Plane Array* (FPA). En este arreglo también se incluyen 48 *fiducials* (marcadores de referencia) que servirán de referencia para el sistema de metrología y calibración y 20 cámaras de adquisición que proveen un preciso alineamiento *on-sky* del instrumento. La Figura 3.4 muestra el *plate* con algunos FPU montados alrededor de *fiducials*, una cámara de adquisición, el campo de vista del telescopio y el campo de vista de una de las cámaras de metrología apuntando hacia ellos.

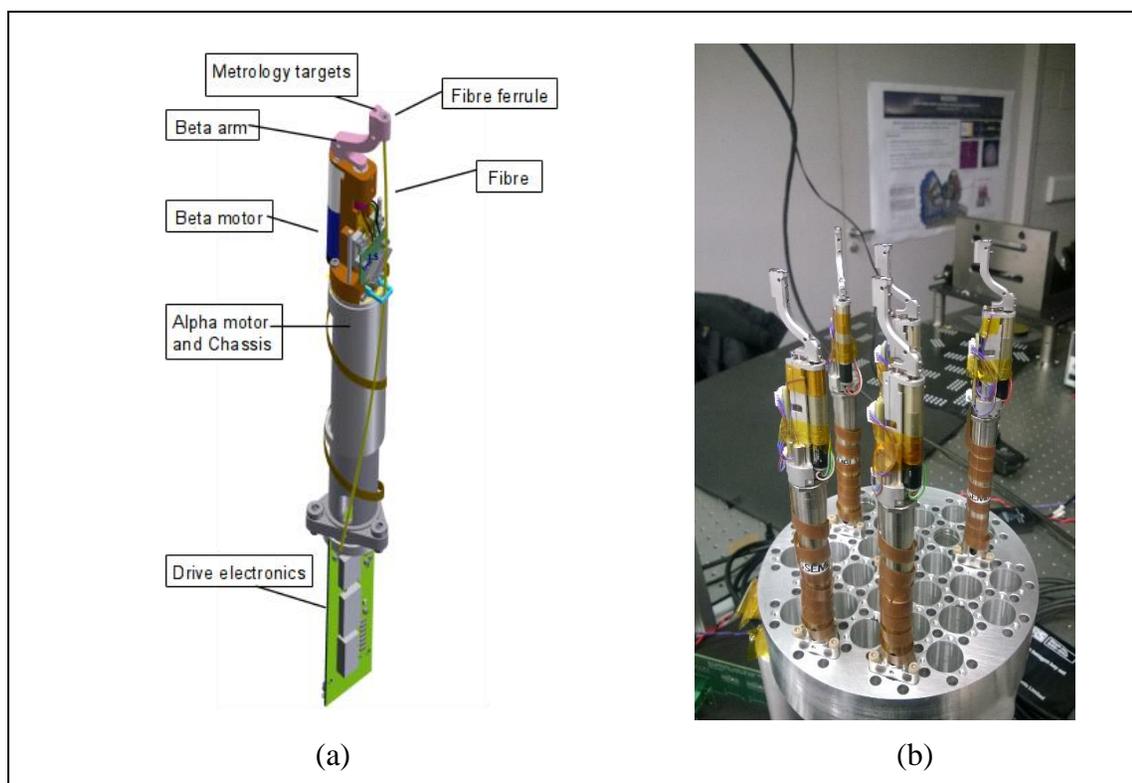


Figura 3.3 *Fiber Positioning Units (FPUs)*. En la figura “a”, se observa el ensamblaje completo del FPU en versión digital CAD. En “b” es posible ver un arreglo de FPU’s montados en un trozo del *plate* sin curvatura, dispuestos para ser testeados.

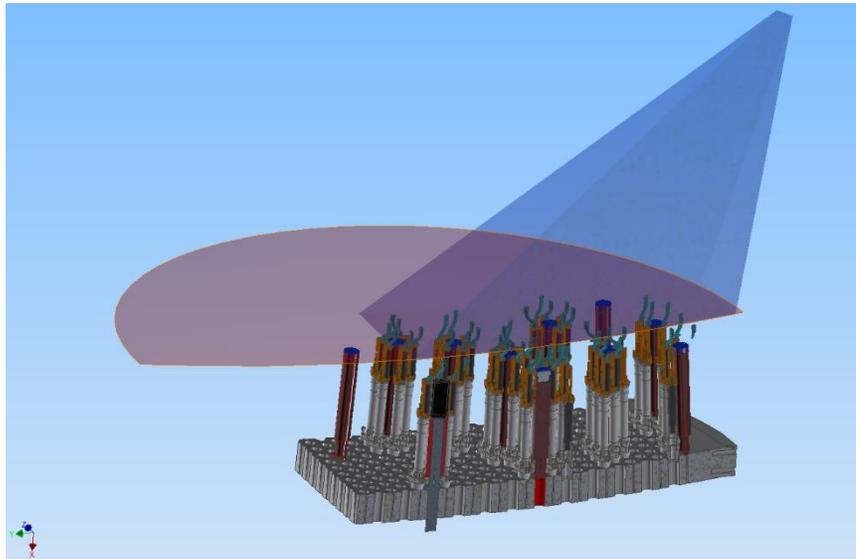


Figura 3.4 Diseño CAD de los FPU's, *fiducials* y una cámara de adquisición (seccionada) montados en un trozo de *plate*. Es posible observar el Plano Focal del telescopio en naranja y el FOV de una cámara de metrología en azul.

### 3.1.2.2. Sistema de metrología y calibración

El sistema de metrología y calibración se basa en 12 cámaras de alta resolución *off-axis* posicionadas en la estructura RFE rodeando el *plate* que soporta las unidades FPU, a una distancia de 566 milímetros del plano focal verticalmente y aproximadamente 635 milímetros en la dirección del eje óptico del objetivo, el cual está inclinado  $28^\circ$  con respecto al eje vertical, coincidiendo en la mitad de su campo de vista proyectado en el plano focal, como se aprecia en la Figura 3.5. El sistema, basado en fotogrametría de rango cercano, está orientado a obtener las posiciones de los FPU respecto a un eje coordenado definido por el usuario y proveer esta información al control de los robots para que estos se muevan hacia el objetivo más cercano formado en el plano focal (Torres-Torriti et al., 2014). El sistema utiliza cámaras de alta resolución IDS UI-3591 LE Rev-2 con un sensor de  $4212 \times 3648$  píxeles de un tamaño de  $1.25 \mu\text{m}$  cada uno y un objetivo Kowa de 8.5 mm de longitud focal.

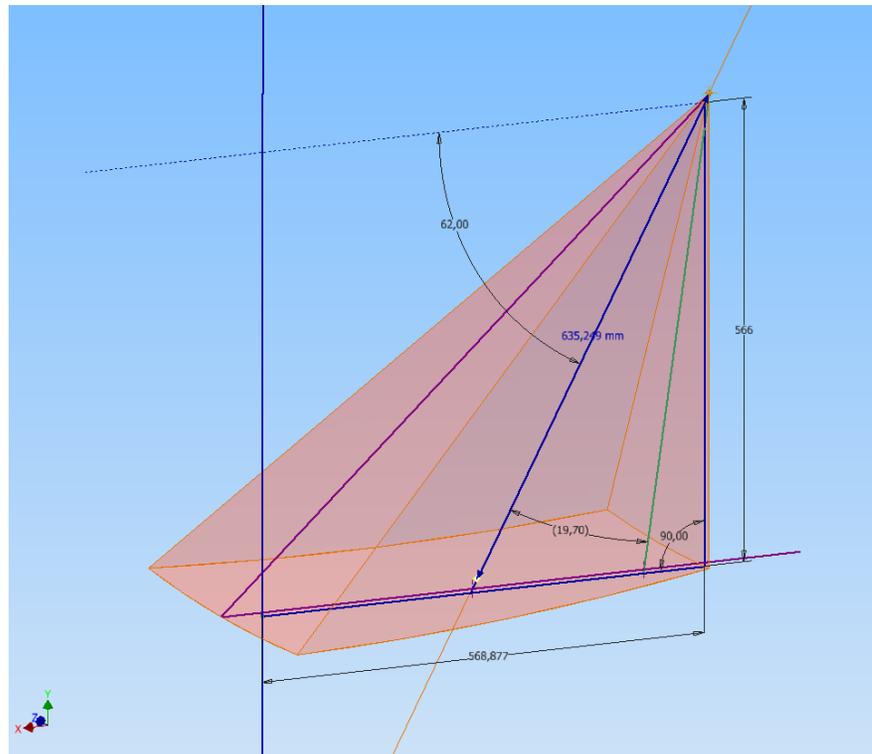


Figura 3.5 Dimensiones campo de vista cámara IDS. Las cámaras son situadas en el punto al extremo superior derecho de la imagen.

El tamaño del campo de vista de cada cámara es de 398 x 346 mm según la Ecuación de Lente Delgada o de Gauss (Hecht, 2017).

$$\frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} = \frac{1}{f} \quad (3.1)$$

$$\frac{h_i}{s_i} = \frac{h_o}{s_o} \quad (3.2)$$

Donde  $f$  es la focal efectiva del objetivo,  $s_o$  es la distancia del objeto,  $s_i$  es la distancia de la imagen hacia el lente,  $h_o$  corresponde al tamaño del objeto y  $h_i$  al tamaño de la imagen. Las cámaras cubren totalmente el plano focal del telescopio a través de la superposición de sus campos de vista (Drass et al., 2016). La Figura 3.6 muestra parte del RFE en donde se ocultan ciertos componentes para poder de ver el interior de este y notar las cámaras, sus campos de vista superpuestos y algunos FPU montados sobre el *plate*.

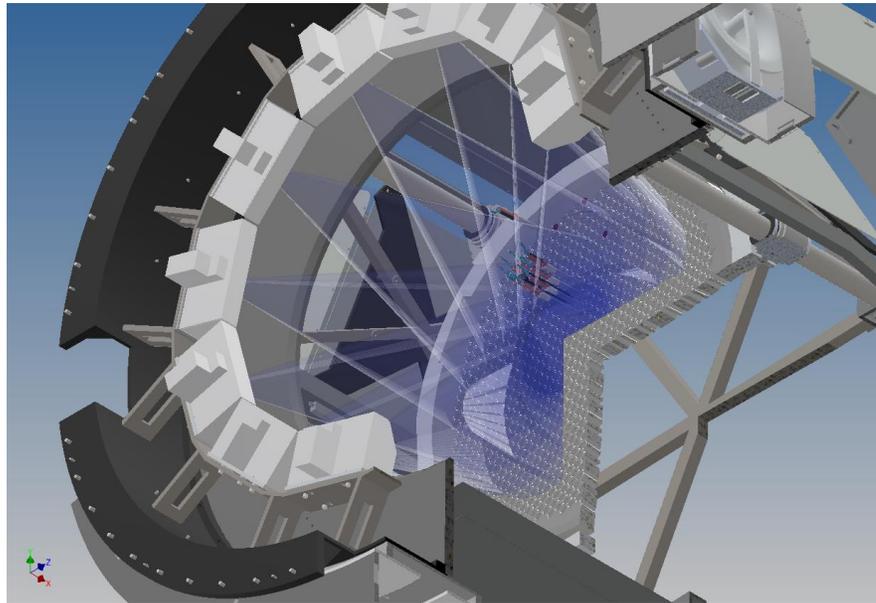


Figura 3.6 Diseño CAD de parte de la estructura RFE. Es posible observar el *plate* curvo, algunos FPU y 9 de las 12 cámaras observando el plano focal con sus respectivos campos de vista (en azul transparente).

### 3.2. Problemas y requerimientos

Existen varios factores que deben ser controlados con el fin de obtener una óptima recepción de datos. Los FPU deben ser posicionados con una exactitud igual o menor a  $20\ \mu\text{m}$ . El ambiente juega un papel importante en el RFE, ya sea la gravedad que afecta a cada componente, deflectándolos, como también la temperatura que provoca expansión o contracción de los materiales y generación de turbulencias en el ambiente circundante del plano focal. Por su lado, el sistema de metrología de los brazos debe lograr obtener, con precisión menor a  $15\ \mu\text{m}$  RMS, la posición de cada brazo, sobrellevando los problemas anteriormente descritos.

### 3.2.1. Multiplicidad

Los espectrógrafos multi-objetos presentan una complejidad mayor a los espectrógrafos de una fibra en cuanto al posicionamiento de las fibras, debido a que habrá varias estrellas en el campo de vista y para cada una debe haber una fibra recibiendo su luz adecuadamente. Ya que las imágenes de los campos de vista observados por los telescopios variarán dependiendo de lo apuntado en el cielo, el sistema de posicionamiento de las fibras tendrá que adaptarse a cada uno de tales campos con la misma precisión y exactitud, llevando a la necesidad de un sistema totalmente confiable, robusto y flexible. Generando un análisis similar al realizado para el *pinhole* de FIDEOS, se busca la máxima distancia permitida como máximo desalineamiento de una fibra respecto a un objeto para mantener una eficiencia mayor o igual a 95%, considerando la situación presentada en Figura 1.3 y graficada en Figura 3.7. La situación es la siguiente:

Tamaño del microlente proyectado al cielo: 1.05 arco-segundos.

Seeings típicos en Paranal  $0.5'' \leq \text{seeing} \leq 1''$

Valores de desplazamiento máximo: 0,05" para un seeing igual a 0.5" y una eficiencia de 98%. Esto se traduce en 20 micrones en el plano focal.

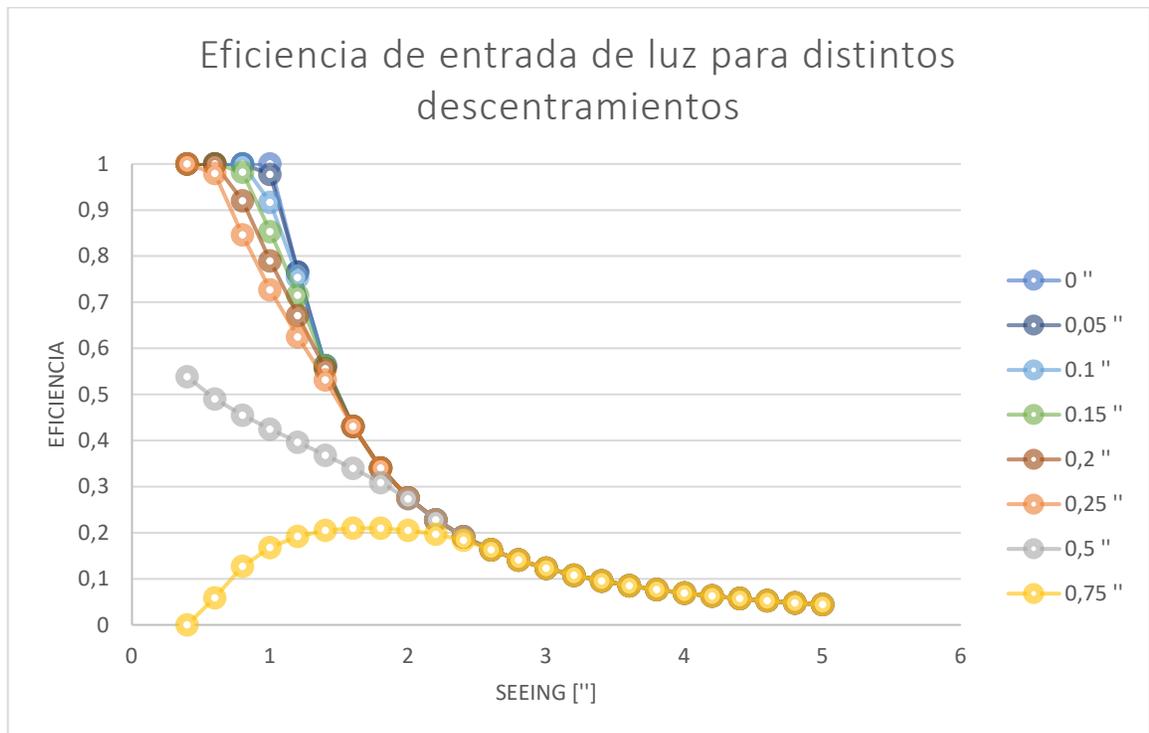


Figura 3.7 Gráfica *seeing* vs eficiencia caso MOONS.

De manera contraria que el telescopio ESO 1 metro de La Silla, el telescopio VLT no puede compensar los desplazamientos de cada fibra por separado, debido a que el RFE solo compensa la rotación del campo de vista provocada por el telescopio.

### 3.2.2. Rigidez y temperatura

Similar a la interfaz de FIDEOS, el RFE de MOONS estará sostenido desde el *Front End* del foco *Nasmyth* del telescopio VLT. El RFE estará siempre paralelo a la superficie del domo y rotará entorno al eje óptico. La estructura, al estar en esta posición, sufrirá de flexión, así mismo los FPU y *fiducials* que estarán en el *plate*, por lo que cada componente debe ser lo suficientemente rígido y bien ensamblado para sobrellevar este requerimiento. Las variaciones de temperatura del ambiente afectarán comprimiendo o expandiendo los materiales de las piezas opto-mecánicas. Particularmente, es indispensable que los *fiducials* presenten una mínima deformación por temperatura, en orden de proveer un patrón de referencia invariante. Las cámaras de metrología y otros componentes eléctricos no deben calentar el ambiente circundante del plano focal, con el fin de evitar la generación de turbulencias internas que provoquen cambios en el frente de onda entrante y, consecuentemente, en la imagen de las estrellas observadas. Según cálculos realizados por el consorcio a cargo del instrumento, la cámara en su totalidad no debe sobrepasar en un grado Celsius (1°C) la temperatura ambiente cercana al objetivo.

### 3.2.3. Fotogrametría de precisión

La técnica de fotogrametría utilizada en el sistema de metrología y calibración de MOONS debe tener alta precisión en la medición de la posición de los FPU para que estos logren generar un emparejamiento eficiente con las estrellas. El resultado de las posiciones será posteriormente leído por el software de control de los FPU que moverá los brazos a las posiciones deseadas. Si el posicionamiento está errado, se perderá la observación. Cualquier efecto adverso sobre el elemento observado por las cámaras, o directamente sobre la cámara, desencadenará errores en la medición.

Las cámaras de metrología, como fue mencionado anteriormente, son acompañadas de un objetivo de focal 8.5 mm, tienen un tamaño de detector de 1/2.3", el tamaño de cada pixel es de 1.25 x 1.25 micrones por lado y están alejadas 635 milímetros del centro de sus campos de vista proyectados en el plano focal del RFE.

Numéricamente, el sistema de metrología debe medir la posición de dos *targets* de 1.5 y 2.5 mm, cada uno situados en cada uno de los FPU. Cabe destacar que se tendrán FPU tanto en el campo cercano como en el campo lejano de la cámara y para efectos de cálculos se tomará la distancia central utilizada para proyectar el campo de vista del detector en el plano focal. De esta forma, los *targets* centrales tendrán aproximadamente un tamaño de 20 y 33 micrones en el detector según las ecuaciones 3.1 y 3.2. Considerando que el detector presenta pixeles de 1.25 micrones por lado, haciendo la conversión apropiada, cada *target* presentará un tamaño de 16 y 26 pixeles radialmente. Por ende, será posible resolver perfectamente cada objeto en el plano de la imagen en la cámara. Adicionalmente, según la tolerancia admitida por cada brazo de 20  $\mu\text{m}$  en su posicionamiento X-Y, el sistema de fotogrametría debe presentar un valor RMS menor en la medición de la posición de cada uno de ellos, con el fin de proveer una referencia precisa al sistema de control de los FPU. El micro lente de las fibras tiene un diámetro de 610  $\mu\text{m}$  que proyectados en el cielo tiene un tamaño 1.05 arco-segundos (Guinouard et al., 2014), por lo que una exactitud de alrededor de 0.1 arco-segundos o 15  $\mu\text{m}$  en el plano focal, es óptimo.

#### **3.2.4. Warm up de la cámara de metrología**

Además de los puntos anteriormente descritos, se debe tener en cuenta un fenómeno intrínseco del sistema de metrología y calibración, que compromete por un lado un aspecto térmico y, por otro lado, un aspecto de la fotogrametría de precisión. Este corresponde al efecto *warm up*, que consiste en el calentamiento de la tarjeta donde está instalado el detector, por el consumo y disipación de energía de los componentes electrónicos. El calentamiento comienza instantáneamente cuando la cámara adquiere las primeras imágenes y se estabiliza tras varios minutos. Esto lleva a una distorsión en las imágenes tomadas, debido a la expansión/contracción de los materiales que componen la tarjeta, del orden de 0.1 pixeles o más. Además, este calor también afecta la óptica sujeta a la cámara (objetivo), cambiando el índice de refracción de sus lentes, desenfocándolos o inclinándolos respecto al eje óptico (Handel, 2007; Smith & Cope, 2010; Wong, 1990; Yu et al., 2014).

Algunos investigadores han estudiado este problema generando diferentes métodos para manejarlo (Dauvin et al., 2017; Handel, 2007; Robson, Clarke, & Chen, 1993).

Un ejemplo de este fenómeno es presentado por (Handel, 2007), en donde se analiza y testea una cámara bajo el efecto *warm up* y se desarrolla una solución que considera el uso de los vectores de desplazamiento de los centroides de los target, obtenidos en el detector tras el calentamiento, como valores *off-set* intrínsecos del detector, que luego son incluidos en cada test nuevo a realizar.

(Handel, 2007) supone dos probables desalineamientos del eje óptico que podrían conllevar a la distorsión: desalineamiento de la tarjeta con el detector respecto al eje óptico de la cámara o desalineamiento del conjunto completo respecto al eje inicial de la cámara antes del calentamiento. En la Figura 3.8 se muestran ambos casos considerados por el autor.

Al igual que las cámaras estudiadas en la literatura, la cámara IDS UI-3590 CP Rev. 2 de metrología también se encuentra afecta a este comportamiento. Considerando los casos estudiados por (Handel, 2007) y haciendo una comparativa con la cámara IDS, es posible encontrar que el movimiento presentado en la cámara podría coincidir con el caso “a”, ya que la mecánica de la cámara es de forma similar.

(Dauvin et al., 2017) midió desplazamientos en la posición de los centroides de los targets observados en el detector del orden de 0.1 píxeles. La Figura 3.9 muestra el promedio de desplazamientos y desviación estándar en los ejes X e Y del detector. La imagen presenta dos curvas, las cuales corresponden a estado alcanzado naturalmente por el *warm up* hasta la imagen 400 y la otra corresponde a la integración de un calentador externo.

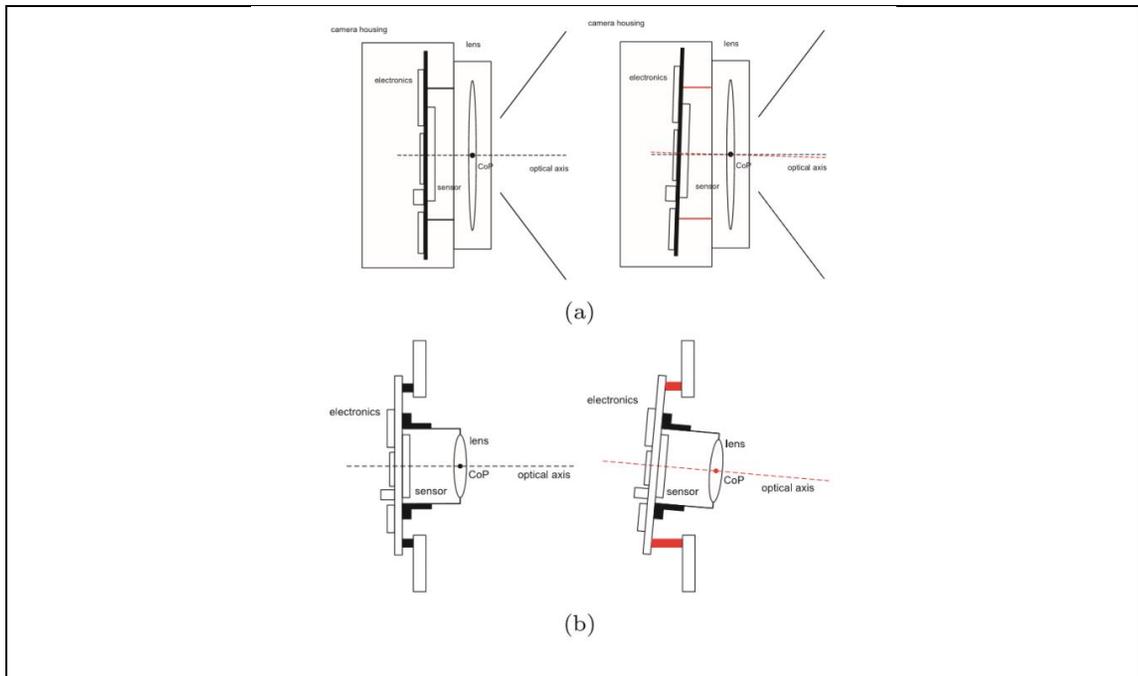


Figura 3.8 Desalineamiento del eje óptico de una cámara debido a un aumento de temperatura. La figura “a” muestra un *tilt* de la tarjeta respecto al eje óptico. La imagen “b” muestra una inclinación *tilt* de todo el conjunto (tarjeta + óptica), respecto del eje óptico

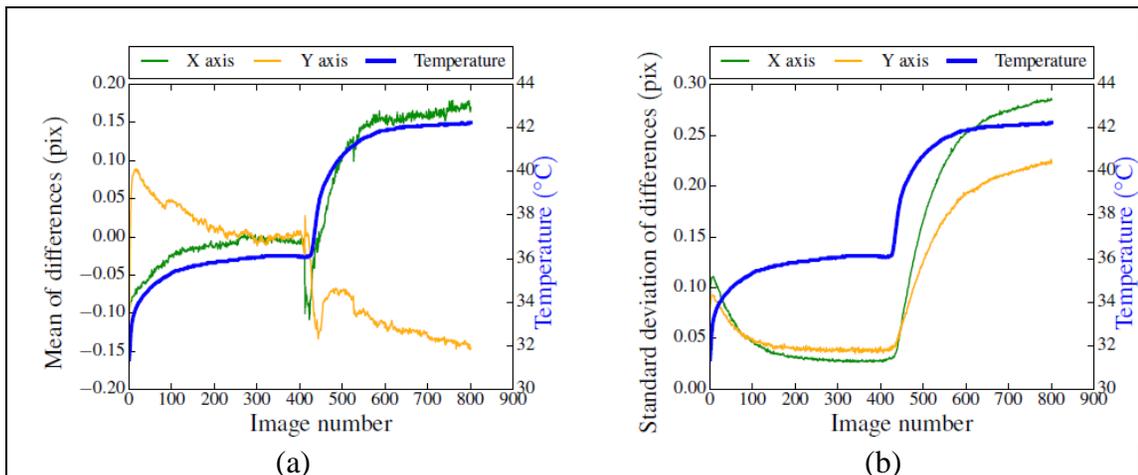


Figura 3.9 Promedio (a) y desviación estándar (b) de los corrimientos de los targets en el detector. Es posible observar que el aumento de temperatura fue de 6°C y el máximo desplazamiento promedio fue alrededor de 0.1 pixel.

Para lograr obtener el comportamiento actual de la cámara IDS UI-3590 CP Rev. 2 frente al calentamiento y consecuente deformación, se realizaron nuevas mediciones tomando como referencia el trabajo de (Dauvin et al., 2017). Los resultados de tales test demuestran el mal comportamiento de la cámara frente al calentamiento, con un desplazamiento de los puntos de hasta 0.4 píxeles (en uno de los ejes) y calentándose cerca de  $12^{\circ}\text{C}$ , respecto a su temperatura inicial (ver Figura 3.10). Es posible ver además que la cámara se comporta de peor forma que en los test realizados por (Dauvin et al., 2017).

Así mismo, se toman imágenes infrarrojas de la cámara, mostrando cómo es el calentamiento de la cámara y del objetivo (ver Figura 3.11). La temperatura del detector para esta medición, según el software de control de la cámara, era de  $36^{\circ}\text{C}$  y la temperatura ambiente era de alrededor de  $21^{\circ}\text{C}$ .

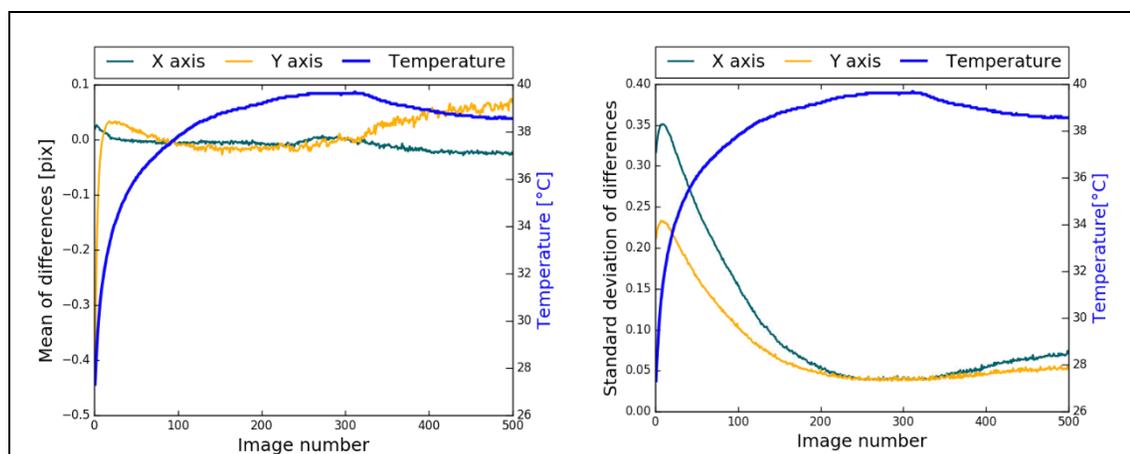


Figura 3.10 Resultados de medición de desplazamientos en cámara IDS UI-3590 CP Rev. 2. Se observa que desde la imagen 300 se presenta un descenso en la temperatura que no afecta en la comprensión total del gráfico, puesto que el mayor desplazamiento ocurre al inicio de la captura de imágenes.

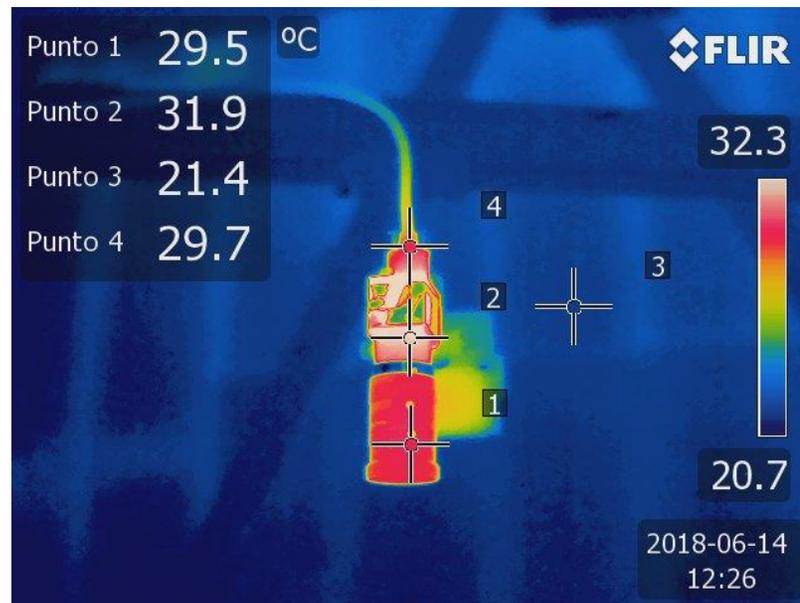


Figura 3.11 Resultado de medición de distribución de temperatura en cámara IDS UI-3590 CP Rev. 2. Se tienen 4 puntos de interés, que corresponden a: objetivo (punto 1), cuerpo de cámara (punto 2), conector USB (punto 4) y ambiente (punto 3).

### 3.3. Soluciones

El efecto *warm up*, que genera un calentamiento de la cámara afectando el aire alrededor de las fibras y que provoca los corrimientos encontrados en el detector de la cámara, es uno de los problemas estudiados en este trabajo.

#### 3.3.1. Solución eléctrico-computacional

(Dauvin et al., 2017) desarrolló un método que usa la función del reloj de píxeles de la cámara (*pixel clock*) para calentar la tarjeta y alcanzar un estado estable de la temperatura (alrededor de 40°C) disminuyendo los desplazamientos presentados en el detector debido a las pequeñas variaciones que presenta en este estado. Esto es suficiente para cumplir con el requerimiento impuesto de máximo desplazamiento, para alcanzar el estado estable se requiere de 7 minutos o más y como este proceso se debe hacer cada vez antes de medir

la posición de los FPU, se perderá bastante tiempo. Además, esta solución no evita el calentamiento del objetivo, que será de igual forma que en la cámara. La Figura 3.12 muestra el resultado obtenido por (Dauvin et al., 2017) usando esta técnica. Las diferencias se obtienen a través de a comparación de cada imagen con una de referencia, que para este caso es la N° 300. Cada *target* de una imagen se habrá desplazado una cantidad respecto a un estado anterior y luego, esos valores de desplazamiento se promedian para obtener el total de la imagen.

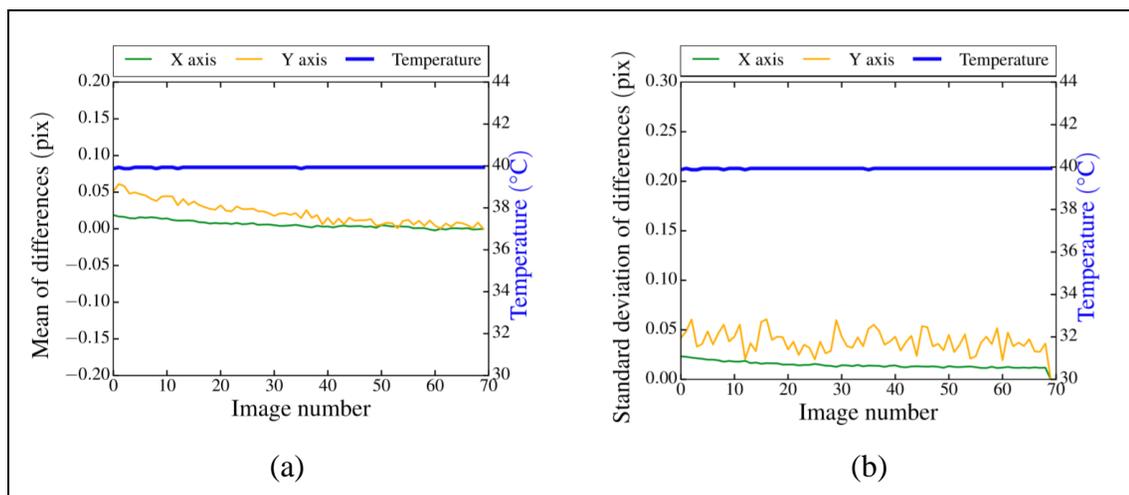


Figura 3.12 Resultados obtenidos por (Dauvin et al., 2017) utilizando la función *pixel clock*. Es posible observar desplazamientos del orden de centenas de pixeles, que son equivalentes a nanómetros en el plano focal.

### 3.3.2. Solución termo-mecánica

Considerando la opción ya implementada en el sistema, se estudia una solución alternativa que evite el uso total o parcial de la función *pixel clock*, optimizando el tiempo de toma de imágenes y el excesivo calentamiento de la cámara.

Si se analiza el problema ocasionado por el efecto *warm up*, se halla que corresponde a un problema de tipo termo-mecánico, puesto que se trata de deformación debida a cambios de temperatura.

En primer lugar, ha de estudiarse y analizarse la cámara actualmente usada y en base a los resultados generar una solución que se adapte al sistema de metrología apropiadamente.

### 3.3.2.1. Modelado primera cámara

Para estudiar y comprender adecuadamente el comportamiento de la cámara de metrología frente al calentamiento del detector y su consecuente deformación es necesario modelar y analizarla en un ambiente digital, usando herramientas CAD y FEA. Los programas computacionales por utilizar corresponden a: Autodesk Inventor Professional y Nastran In-CAD. En primera instancia se requiere del modelo 3D de la cámara, el que puede ser descargado de la página web del fabricante. En segundo lugar, se debe adaptar el modelo adquirido para poder simularlo. En la Figura 3.13 es posible observar el modelo descargado con el modelo adaptado para el proceso. Finalmente, teniendo el modelo listo, se procede a generar el pre-proceso para el análisis FEA.

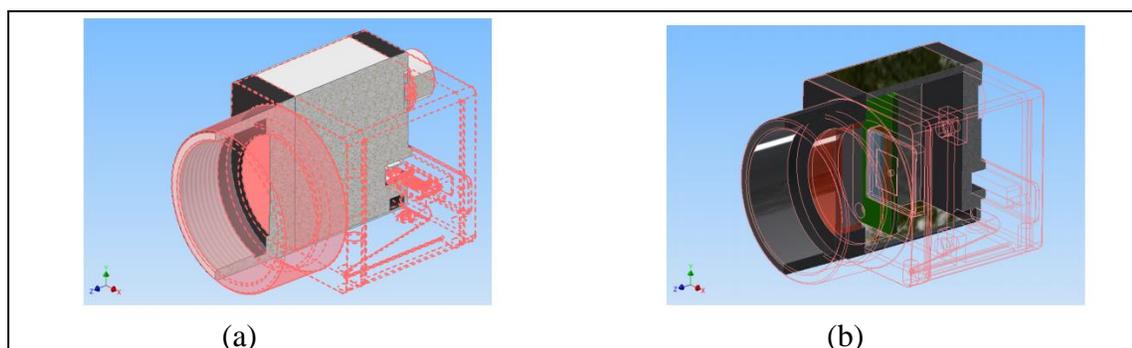


Figura 3.13 Modelos CAD de cámara IDS UI-3590 CP Rev. 2. La figura “a” muestra un corte transversal del modelo 3D obtenido de la página del fabricante, en donde se observa solo un sólido sin componentes al interior. La figura “b” muestra el modelo diseñado considerando una geometría simple de la tarjeta al interior, el detector y también la óptica protectora.

### 3.3.2.2. Proceso FEA en cámara IDS UI-3590 CP Rev. 2.

En el ambiente de usuario de Nastran In-CAD, se carga el modelo preparado en Inventor, se le asignan propiedades de los materiales constituyentes y luego se agregan los parámetros necesarios para el análisis. La Figura 3.14 muestra la configuración aplicada al modelo.

Se consideran dos casos a estudiar: el primero corresponde a un análisis estático, con el fin de dilucidar la distribución de la temperatura en la tarjeta y, el segundo, transiente, para lograr ver el intercambio de calor desde la tarjeta hacia el cuerpo de la cámara.

Los parámetros asignados son los siguientes:

- **Materiales:**
  - *Board*: FR4 (plástico reforzado con fibra de vidrio).
  - Detector: Vidrio.
  - Cáscara de recubrimiento: Acero Inoxidable.
  - Conexión a objetivo y parte trasera: Aluminio 6061.
  - Vidrio protector: Vidrio.
- **Tipos de análisis:**
  - Transferencia de calor estacionaria lineal.
  - Transferencia de calor transiente no-lineal.
- **Malla:** Malla sólida con elementos de tamaño 1 mm.
- **Cargas:** Carga de temperatura de 307 K aplicada al cuerpo entero del detector y a la cara principal del *board* en contacto con la carcasa de la cámara.
- **Restricciones:**
  - Temperatura de 301 K aplicada en las conexiones de la tarjeta a la montura del interior de la cámara.
  - Temperatura de 301 K aplicada en la conexión con la montura donde se sujeta la cámara.
- **Condición inicial (2do caso):** Temperatura general de los cuerpos de 301 K.

- **Duración (2do caso):** 420 segundos, correspondiente a los 7 minutos que le toma al detector aumentar la temperatura gracias al uso del *pixel clock*. Tiempo obtenido del trabajo de Dauvin.

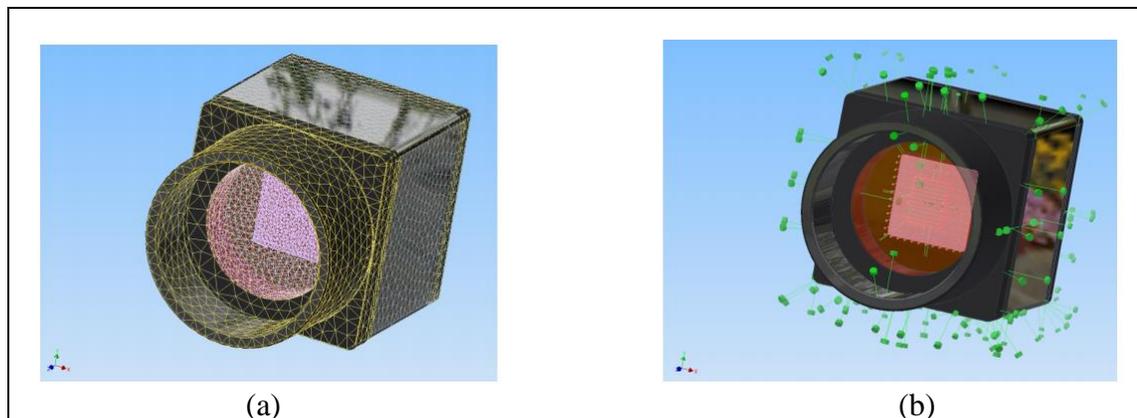


Figura 3.14 Parámetros de análisis FEA en cámara IDS UI-3590 CP Rev. 2. La figura “a” muestra el mallado (en amarillo) realizado en el modelo de la cámara. La figura “b” muestra en color verde las cargas y condiciones de borde aplicadas al modelo en las caras donde actúan.

### 3.3.2.3. Resultados de análisis FEA

El proceso de análisis finaliza con la entrega de los resultados obtenidos para el caso estudiado. En la Figura 3.15 es posible evidenciar el calentamiento del detector y la distribución de la temperatura hacia sus costados y en la Figura 3.16 se aprecia la distribución de la temperatura desde el interior de la cámara hacia el exterior. Cabe mencionar que cada caso cumple una misma función, la que es mostrar la distribución de la temperatura en la cámara, pero en cada uno se realiza de una forma diferente, con el fin de evidenciar cambios en la tarjeta misma como en el cuerpo completo de la cámara.

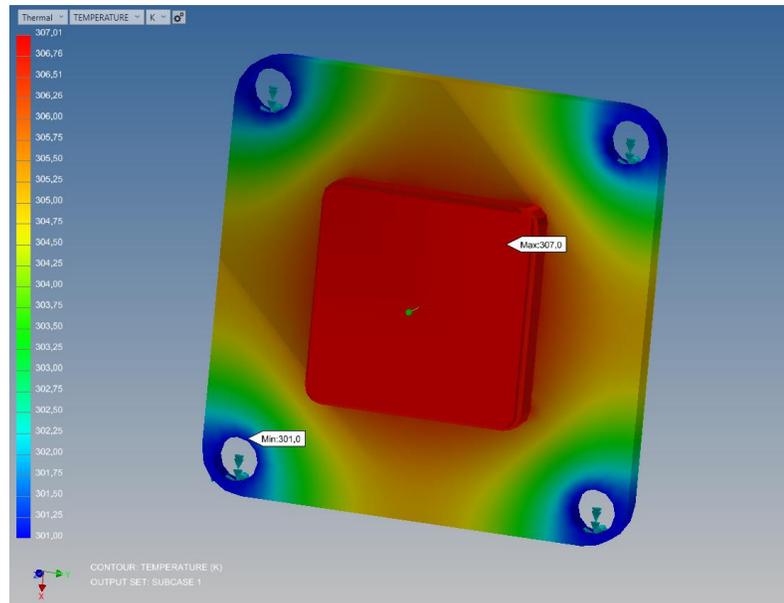


Figura 3.15 Distribución de la temperatura en la tarjeta de la cámara IDS UI-3590 CP Rev. 2. Es posible notar las condiciones de borde (4 puntos azulados) y carga en el diseño (centro detector en rojo), donde está la menor y mayor temperatura respectivamente.

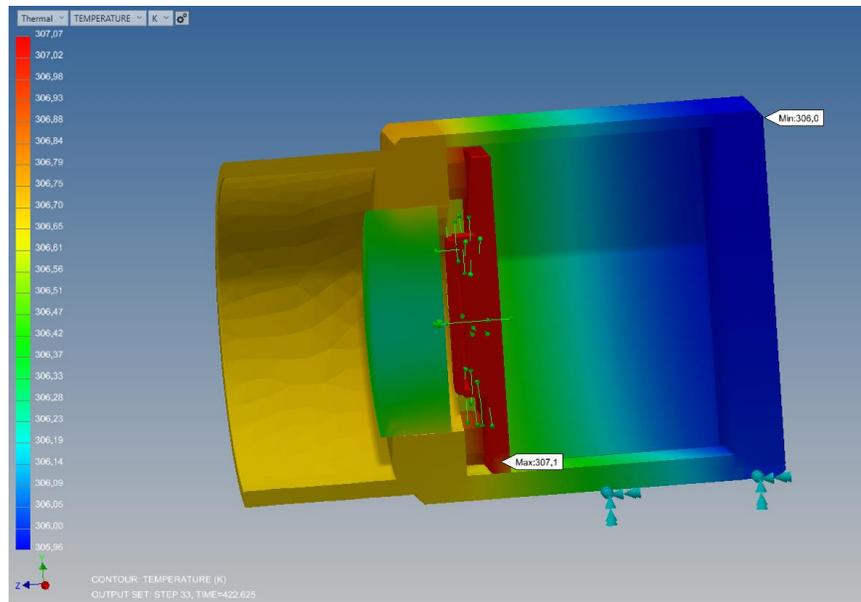


Figura 3.16 Distribución de la temperatura desde la tarjeta hacia el exterior del cuerpo de la cámara IDS UI-3590 CP Rev. 2. Es posible notar que el máximo se encuentra en la tarjeta y el mínimo, donde está la condición de borde.

Posterior a los resultados de distribución de la temperatura en el modelo, se considera la opción de observar la deformación provocada por el cambio de temperatura. La adaptación del resultado térmico al análisis mecánico es simple e intuitivo gracias a la interfaz de Nastran In-CAD, solo debe asignarse como carga térmica el resultado obtenido en el análisis térmico y la condición de borde fija donde se sujeta la cámara. La Figura 3.17 muestra el resultado de esta simulación.

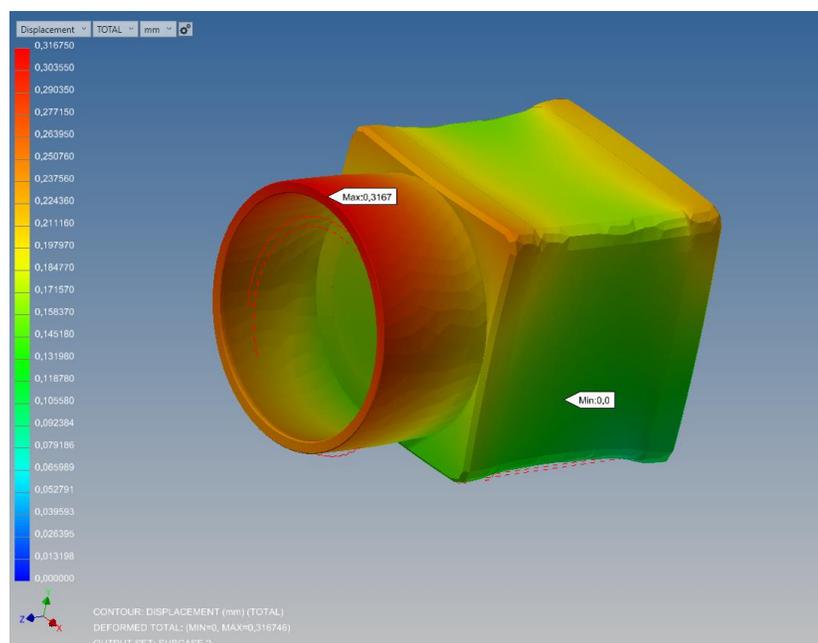


Figura 3.17 Deformación mecánica en la cámara IDS UI-3590 CP Rev. 2 debido a la distribución de temperatura en el cuerpo completo. El máximo valor es de 317  $\mu\text{m}$ , situado en el extremo de la conexión del cuerpo al objetivo.

El resultado de la simulación termo-mecánica de la cámara muestra que las partes con el mayor desplazamiento son las de aluminio, específicamente la sección libre que queda en contacto con el objetivo, presentándose como una expansión radial con un valor de 310 micrones. Esto debido al alto valor de su Coeficiente de Expansión Térmica (CTE). Además, tomando en cuenta que el material del cuerpo del objetivo también es aluminio, habrá desplazamientos indeseados que provocarán descentramientos de las lentes como también *tilts* en ellas, induciendo aberraciones ópticas que mermarán el desempeño del sistema.

### 3.3.2.4. Diseño de nuevo *enclosure*

Según los resultados del proceso FEA, que demuestran el comportamiento frente a la temperatura para la primera cámara, se procede a estudiar la solución que consideraría el desarrollo de una nueva carcasa (*enclosure*), dejando de lado la opción de adquirir una cámara con carcasa provista por IDS. Se escoge el modelo IDS UI-3591LE (ver Figura 3.18) que tiene las mismas prestaciones que la cámara antigua, pero incluye un pequeño protector del detector en vez de carcasa, que no interviene en el próximo montaje de la tarjeta en el nuevo cuerpo.



Figura 3.18 Modelo de cámara IDS UI-3591LE.

Tomando en cuenta la utilización de materiales con propiedades mecánicas excepcionales en diferentes campos termo-mecánicos (aislación, nula deformabilidad, conducción de calor y rigidez) y sumado a varias iteraciones de diseño, se llegó al modelo final del conjunto completo de la cámara, mostrado en la Figura 3.19, el cual optimiza la disipación de calor hacia el medioambiente, la aislación del objetivo hacia el cuerpo de la cámara y controla la expansión del cuerpo.

El modelo está constituido por las siguientes partes y materiales:

- **Cuerpo cámara**
  - Material: Invar 36
  - Funciones
    - Dar soporte a la tarjeta y detector, objetivo y demás componentes.
    - Tomando ventaja del bajo coeficiente de expansión térmica del Invar, evitar deformaciones por temperatura.
  
- **Conector objetivo-carcasa**
  - Material: Polímero Acetal
  - Funciones
    - Dar conexión al objetivo de 8.5 mm y al cuerpo de la cámara.
    - Evitar el traspaso de calor desde la cámara al objetivo, evitando así deformaciones en el cuerpo de este.
  
- **Disipador de calor**
  - Material: Cobre
  - Funciones
    - Dar soporte al cable de conexión USB 3.0
    - Permitir la transferencia de calor desde la tarjeta al medio ambiente.
  
- **Lámina aislante**
  - Material: Policarbonato
  - Función: aislar el cuerpo de la cámara.

- **Banda térmica (*thermal strap*)**
  - Materiales
    - Aluminio 1100 (banda)
    - Cobre (piezas conectoras)
  - Función: pieza agregada que permite una mejor extracción del calor desde el interior de la cámara hasta la estructura que va instalada en el RFE.

Cabe destacar que se utilizan pernos de plástico entre la tarjeta y el cuerpo con el fin de aislar ambas partes.

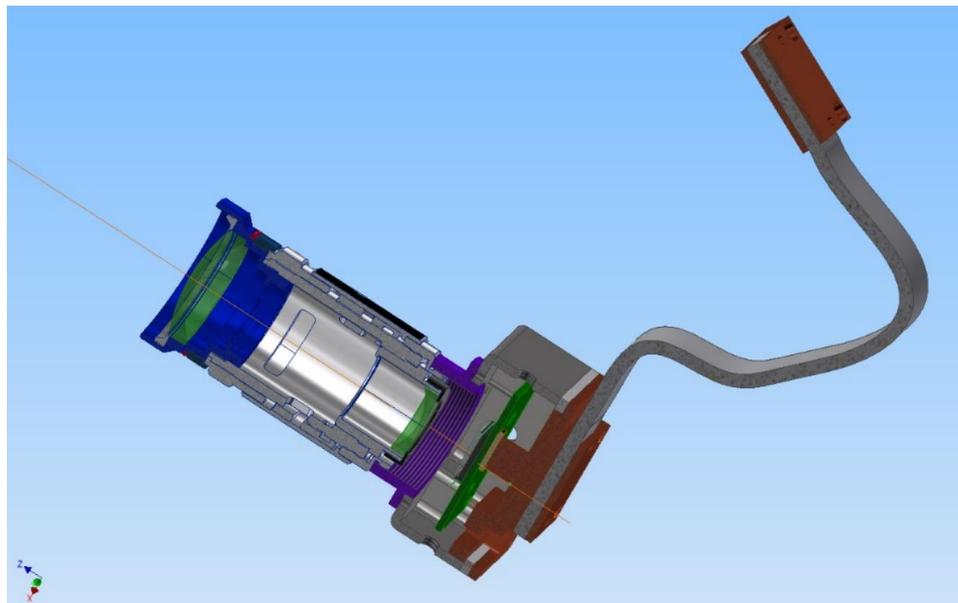


Figura 3.19 Diseño CAD del nuevo modelo de cámara de metrología. Se observa, de izquierda a derecha: el objetivo de 8.5 mm, el conector cámara-objetivo (en morado), el cuerpo de la cámara (en plomo), la tarjeta junto al detector (en verde y secciones negras), una lámina aislante (en blanco), un dissipador de calor (en café) y una banda térmica (en café y plomo).

### 3.3.2.5. Proceso FEA nuevo *enclosure*

Similar al análisis realizado para el modelo de la cámara antigua, se realiza un nuevo proceso de análisis por medio de elementos finitos en el nuevo modelo, con el fin de obtener su respuesta frente al efecto *warm up*.

El análisis considera lo siguiente:

- **Materiales**
  - *Board*:
    - FR4 (plástico reforzado con fibra de vidrio).
    - Microcontrolador: polietileno
    - Conexión detector - placa: oro
    - Detector: Vidrio.
  - Cuerpo de la cámara: Invar 36
  - Conexión objetivo-carcasa: Polímero acetal
  - Lámina aislante: Acrílico
  - Placa disipadora: Cobre
  - Banda térmica: Cobre
- **Tipos de análisis:**
  - Transferencia de calor transiente no-lineal.
- **Malla:** Malla sólida con elementos de tamaño 5 mm.
- **Cargas:** Carga de temperatura de 307 K aplicada al cuerpo entero del detector y a la cara principal del *board* en contacto con la carcasa de la cámara.
- **Restricciones:**
  - Temperatura de 301 K aplicada en la conexión con la montura donde se sujeta la cámara.
- **Condición inicial:** Temperatura general de los cuerpos de 301 K.
- **Duración:** 420 segundos, al igual que para el primer análisis.

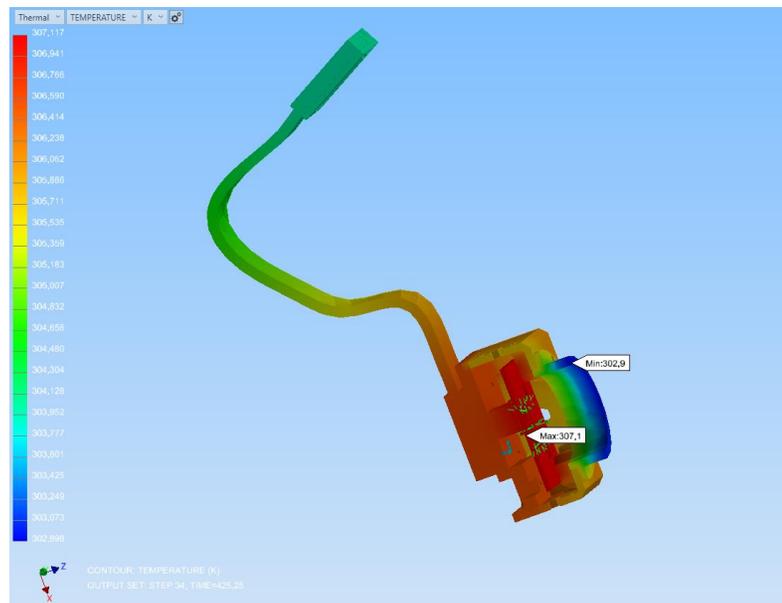


Figura 3.20 Resultado del análisis térmico en el nuevo cuerpo de la cámara. Es posible observar el flujo de calor hacia el sector requerido (banda térmica y no hacia el objetivo)

Generando una comparación entre los resultados de ambas cámaras, podemos notar una ventaja del segundo diseño en cuanto a la disipación efectiva del calor desde el interior de la cámara y la aislación de temperatura del cuerpo hacia dónde va conectado el objetivo (en azul en Figura 3.20). Se debe mencionar que no fue agregado en los análisis el fenómeno de convección, ya que el movimiento del aire dentro de la caja de metrología (donde irá montada la cámara y sus luces) será casi nulo.

Numéricamente hablando, la segunda cámara presenta una temperatura de 302.9 K en el conector del objetivo, en comparación a la primera que presentaba un valor de 306.5 K en el mismo lugar, en donde para cada una la temperatura del ambiente establecida era de 301 K. De hecho, para la segunda cámara, el menor valor presentado en todo el modelo se encuentra en tal lugar. Esto conllevaría a que el objetivo presente una igual o menor temperatura, así, el modelo podría cumplir con el requisito impuesto de no presentar un delta máximo de temperatura entre el objetivo y el ambiente de 1 grado. De esta forma, el modelo, debe ser fabricado y testeado en un ambiente controlado con el fin de vislumbrar su comportamiento en esta situación, en la realidad, para verificar la hipótesis.

### 3.3.2.6. Solución de montura auto-centrante

Habiendo, en primera instancia, solucionado el problema de disipación de la energía, se procede a generar una posible solución para sobrellevar el problema de los desplazamientos en el detector. Analizando la literatura opto-mecánica, se encuentra que se ha estudiado y analizado el problema de expansión y contracción de lentes en ambientes con variaciones de temperatura considerables para su entorno, mayoritariamente en aplicaciones con criogenia (Sánchez et al., 2017). El tipo de montura utilizado es llamado auto-centrante o *self-centering* (Ahmad, 1996; Fischer, Tadic-Galeb, & Yoder, 2008, US 9,244,245 B2, 2016; Yoder, 2008). Basándose en estas referencias, se estudian varias opciones que pudiesen adaptarse al problema presentado en la tarjeta del detector. Tras varios prototipos, se opta por un diseño que considera 4 pernos con resorte (o resortes en su defecto) que apoyan la tarjeta en el centro de sus caras laterales. Se prescinden de los pernos que afirman el detector al cuerpo y solo se deja la placa disipadora en contacto con la tarjeta proveyendo de una condición de borde de no movimiento en Z y si traslación en X e Y. La presión ejercida en los 4 pernos debe ser cero al inicio del calentamiento, para evitar la contracción previa de la tarjeta y así permitir solo su expansión. La Figura 3.21 muestra el diseño CAD del prototipo final.

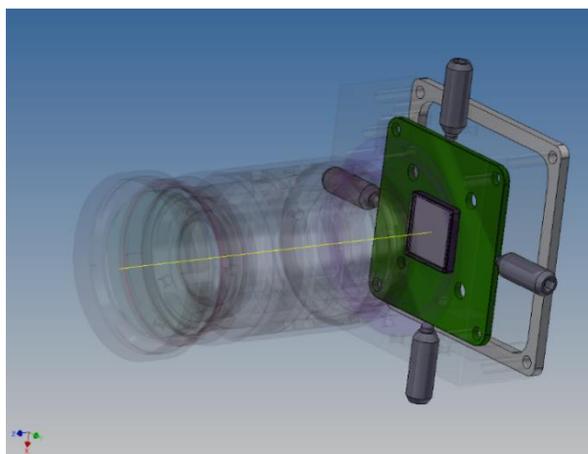


Figura 3.21 Diseño mecánico de montura auto-centrante. Se destacan los 4 pernos con resorte (*plungers*) que sujetan en los puntos medios de las caras laterales de la tarjeta.

Para obtener la respuesta de este modelo frente al calentamiento, se debe realizar otro proceso de análisis FEA que considere la deformación debida un cambio de temperatura dado, obteniéndose así una respuesta termo-mecánica de toda la tarjeta. Para tal tarea solo se considera el *board* con 4 conexiones de resorte agregadas en el ambiente de Nastran In-CAD. La Figura 3.22 muestra la configuración del modelo analizado. Se debe destacar que al modelo se le han extraído todos los microcomponentes y la conexión USB, dejando solo la tarjeta con la conexión del detector y el microcontrolador (que es el que se calienta a la hora de comenzar a tomar imágenes). En la Figura 3.21 puede observarse parte de la tarjeta sin las condiciones del análisis FEA.

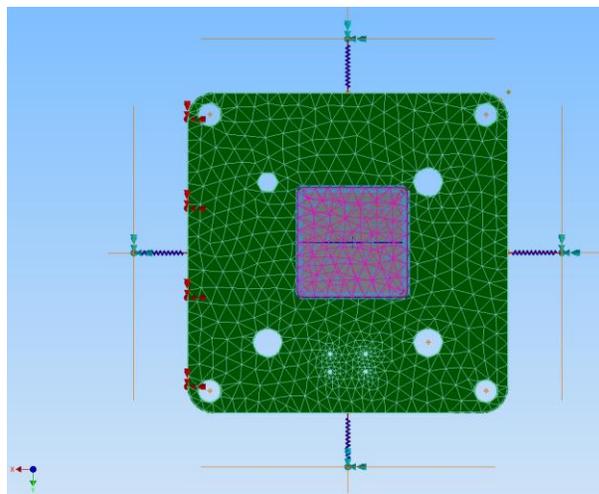


Figura 3.22 Modelo optimizado de la tarjeta con resortes para el análisis FEA. Se aprecia el mallado de cada componente como también los resortes y sus condiciones de borde en los extremos de estos.

Parámetros:

- **Materiales**
  - FR4 (plástico reforzado con fibra de vidrio)
  - Microcontrolador: polietileno
  - Conexión detector - placa: oro
  - Detector: Vidrio.
- **Tipos de análisis:**
  - Análisis transiente no-lineal

- **Malla:** Malla sólida con elementos de tamaño 2 mm.
- **Cargas:** Carga de temperatura de 307 K aplicada al cuerpo entero del detector
- **Restricciones:**
  - Fijo en eje z en ambas caras del *board*.
  - Fijo en los 4 puntos de término de los resortes
- **Condición inicial:** Temperatura general de los cuerpos de 301 K.

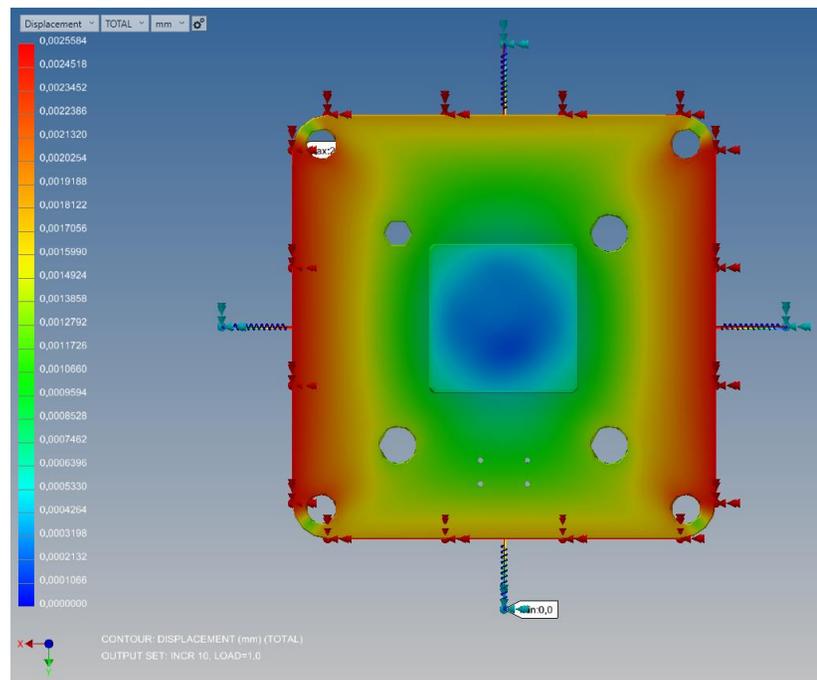


Figura 3.23 Desplazamientos presentados en la tarjeta posterior a un aumento de temperatura de  $6^{\circ}$  K. Se nota un desplazamiento mayor en el eje X igual a  $2,5 \mu\text{m}$ , debido a la estructura ortotrópica del material FR-4.

Observando los resultados entregados por el software para este modelo, ver Figura 3.23, es posible notar que los desplazamientos presentados en el detector después del calentamiento son del orden de  $0.2 \mu\text{m}$ , que traducidos en desplazamiento en el plano focal equivalen a  $15.15 \mu\text{m}$ , por lo que se considera este caso como una opción viable para ser testeada.

### 3.3.3. Mediciones

Para lograr comprobar que ambos modelos simulados cumplen con los requerimientos exigidos, es necesario testarlos bajo las condiciones de trabajo utilizadas para la primera cámara IDS.

Se deben realizar 2 tipos de mediciones: la primera consiste en la medición de la distribución de la temperatura en el modelo, con el fin de verificar que la cámara no se caliente más allá de 1°C sobre el ambiente. Para este caso se monta de dos formas, la primera sin la caja de metrología y la segunda incluyéndola. Luego de la medición de la temperatura, se realiza la medición de los desplazamientos en el detector usando la configuración normal y luego la auto-centrante, sin la utilización de la caja de metrología.

#### 3.3.3.1. Fabricación prototipo

Antes de tomar las mediciones, es necesario fabricar los dos modelos de cuerpo: el que no usa pernos con resorte y el que los incluye. La tarea comienza con la fabricación de los cuerpos principales (ver Figura 3.24), posteriormente se prosigue con el torneado del conector objetivo-cámara, cortado laser de la lámina aislante, soportes para su correcta montura, mecanizado de la placa disipadora de calor y finalmente con la fabricación de la banda térmica.

Los modelos armados en su totalidad pueden observarse en la Figura 3.25.

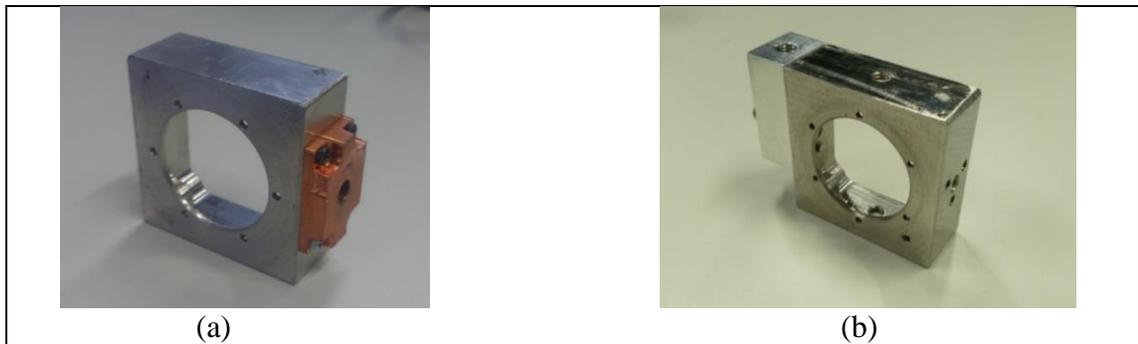


Figura 3.24 Cuerpo principal de la carcasa. Se observa en el modelo “a” la inclusión de una pieza de cobre que ayuda a montar la cámara en su soporte y además facilita la disipación de calor. En el modelo “b” se observan los orificios laterales donde van montados los pernos con resorte y los pequeños orificios a su alrededor para montar la pieza donde se sujeta el cuerpo.

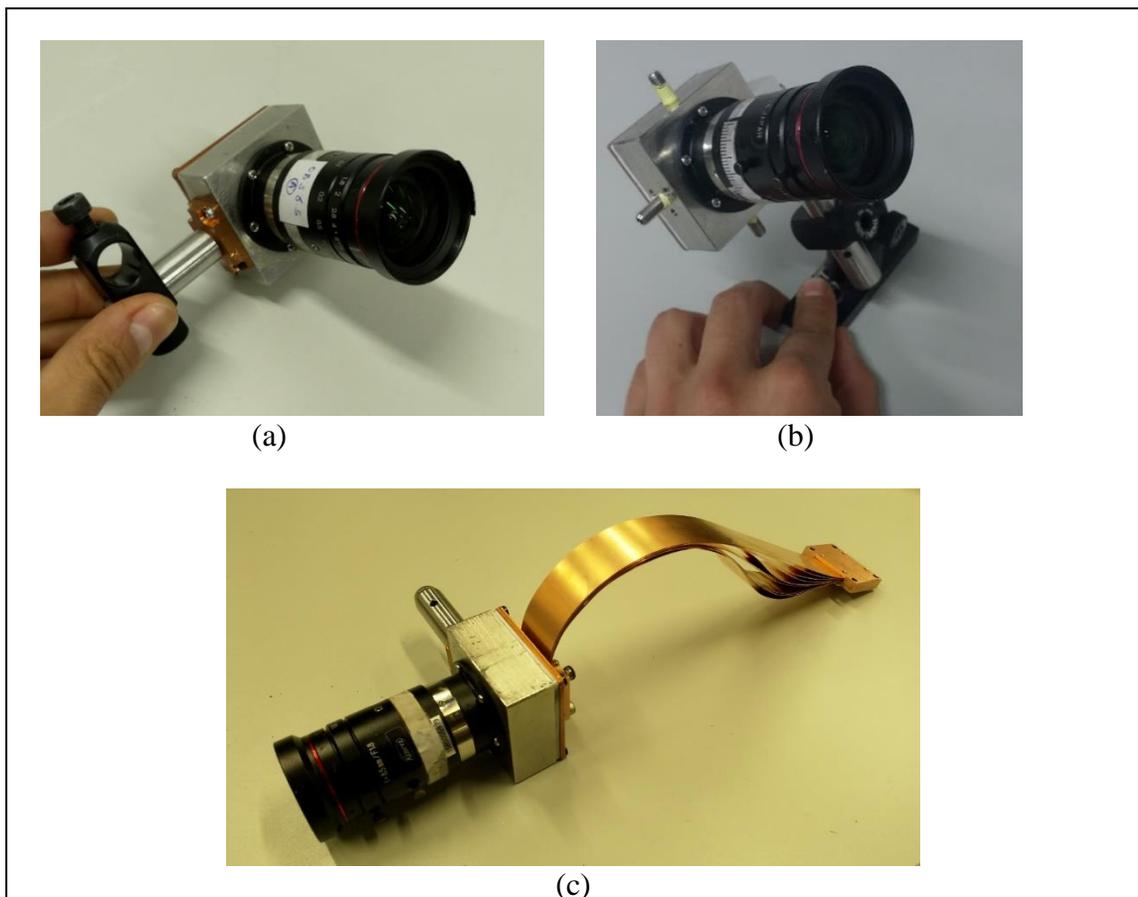


Figura 3.25 Montajes simples de la carcasa de la cámara. Modelos ya finalizados y ensamblados. Se observa en la imagen “a” la cámara sin resortes, en “b” el cuerpo con los pernos con resorte y en “c” el cuerpo sin pernos con la inclusión de la banda térmica.

Para la realización de la medición de la temperatura de la cámara, se necesita fabricar la caja de metrología que sostiene a la cámara y la luz. Tanto el modelo CAD como el modelo fabricado pueden observarse en la Figura 3.26.

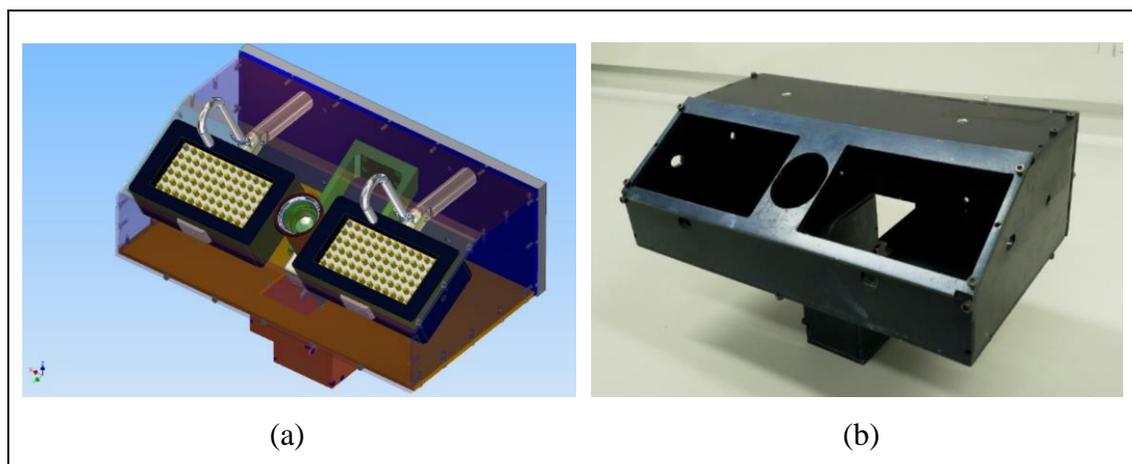


Figura 3.26 Diseño CAD (a) y diseño fabricado (b) de la caja de metrología.

### 3.3.3.2. Montaje y procedimientos de medición

Al igual que para las primeras mediciones realizadas por Dauvin, se monta la cámara en soportes Thorlabs (ver Figura 3.25) y luego se sujetan los soportes a la estructura esqueleto de aluminio. La cámara es situada en el centro de una barra cruzada, como es posible de observar en Figura 3.27 y la placa es situada bajo ésta. Estando ya instalada, se miden los 560 mm desde la placa hasta, aproximadamente, la superficie del detector. Esta configuración es la idónea para la realización de la medición de los desplazamientos y tomando ventaja de ella, se mide la distribución de temperatura con el calentamiento.

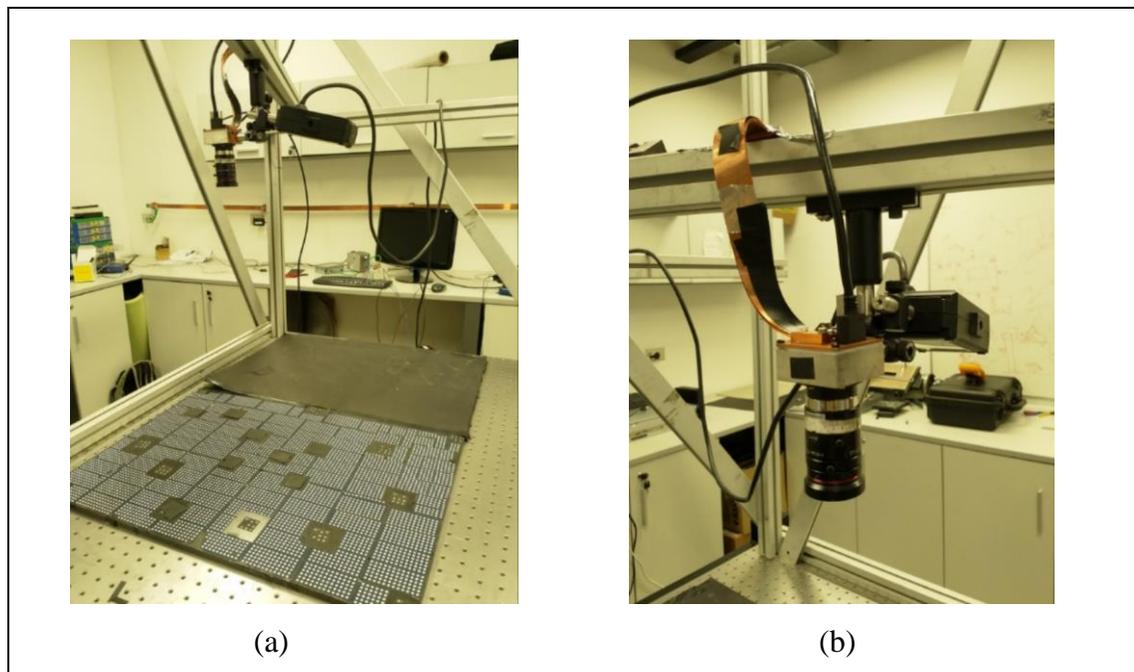


Figura 3.27 Disposición de la cámara con la nueva carcasa dispuesta a ser testeada. En figura “a” es posible apreciar la estructura de aluminio que soporta la cámara y la luz y también la placa de calibración. En figura “b” se realiza un “zoom” al conjunto de cámara y luz para observar de mejor forma el montaje.

Para la realización del test de temperatura de la cámara montada dentro la caja de metrología, se debe cambiar la configuración utilizada previamente. Es necesario instalar la caja de metrología sujeta de la estructura de aluminio y dentro de la caja debe montarse la cámara y la luz. La configuración de este conjunto puede observarse en Figura 3.28.

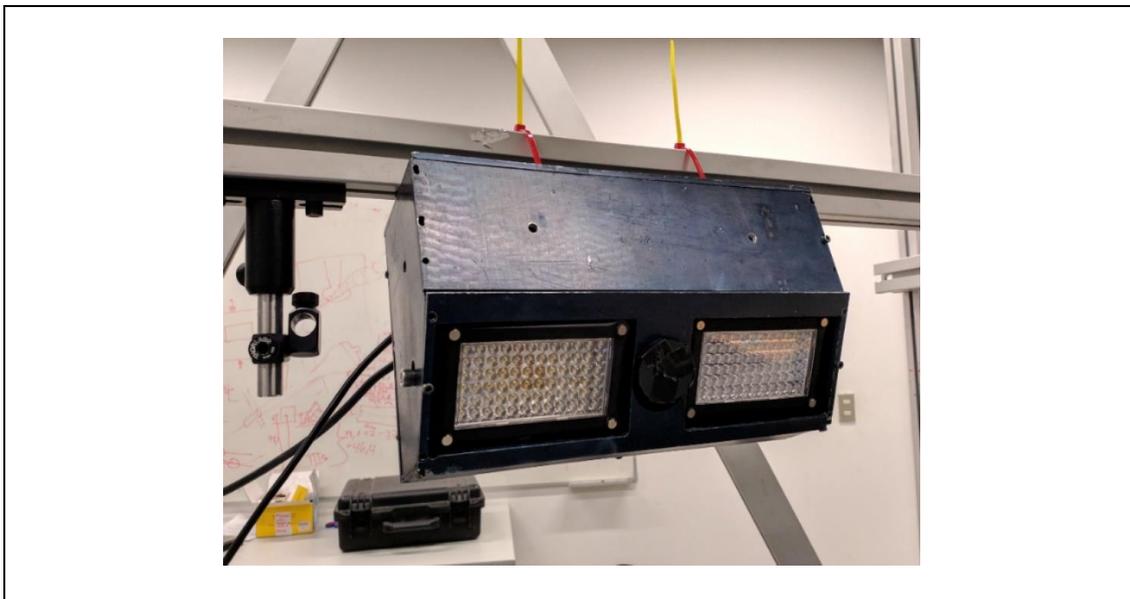


Figura 3.28 Cámara montada en la caja de metrología. Es posible ver ambas luces y el objetivo cubierto con cinta negra en orden de poder notar su temperatura con la cámara IR. Así mismo, se observa que está montada de manera aleatoria con solo dos huinchas, ya que su función es demostrar su comportamiento con la temperatura y no tomar imágenes.

El proceso de medición de la temperatura se realiza de la siguiente forma:

- Con la cámara instalada, se inicia el software de control (*ueyedemo*) y se corre el modo video con el fin de estabilizar la temperatura.
- Mediante el software de manejo experto de la cámara (*ueyecameramanager*), se visualiza la temperatura que está alcanzado la cámara y en caso de llegar muy alto, se detiene la obtención de imágenes y se deja solo conectada.
- Con la cámara estabilizada, se procede a tomar imágenes con la cámara infrarroja.
- Este procedimiento se hace para la cámara con y sin carcasa.
- Cabe destacar que deben instalarse cintas adhesivas negras con el fin de lograr observar la temperatura del cuerpo, de la placa disipadora y del objetivo. Esto debido a que los materiales de los que están hechos reflejan la temperatura ambiente o de fuentes generadoras de calor como focos, personas, etc.

El proceso de medición de los corrimientos se realiza de la siguiente forma:

- En primera instancia se inicia la cámara con el software *ueyedemo*, con el fin de ajustar el campo de vista en la placa, el foco y la apertura.
- Teniendo la cámara ajustada, se procede a correr el código desarrollado por Dauvin para tomar las imágenes, que define la cantidad de tomas (500), la cantidad de imágenes tomadas en cada exposición (10 capturas por cada imagen procesada), el tiempo de exposición de cada una de esas capturas (400 milisegundos), la temperatura al comienzo de la captación (20°C) y su nombre.
- Se toma una imagen de prueba con el fin de corroborar el campo y ajustar la iluminación (homogeneidad en todo el campo).
- Desde el paso anterior se pueden tomar dos caminos, utilizar una temperatura baja sin utilizar la función del *pixel clock* o aumentar la temperatura de inicio para lograr la estabilización.
- Después de la adquisición de imágenes se corre otro *script* que procesa las imágenes y extrae de ellas los targets, creando un catálogo de cada imagen para su posterior análisis.
- Teniendo las imágenes y sus respectivos catálogos, se crea un directorio donde se guardarán, en una carpeta las imágenes y en otra los catálogos.
- Para la obtención de la temperatura en el test, se corre un código que extrae la temperatura que muestra el *header* de la imagen y luego la grafica en función del número de imágenes. Así mismo, ese código, genera otro grafico que entrega la cantidad de luz en el test.
- De manera similar, se corre un código que obtiene las diferencias entre el catálogo de una imagen de referencia (en donde la temperatura ya es estable) con los demás catálogos. Este código entrega la desviación estándar y el promedio de los desplazamientos de los targets, entre otros gráficos.
- Para la cámara con y sin resortes se realiza el mismo procedimiento de medición.

### 3.4. Resultados

En esta sección se exponen los resultados de la medición de la temperatura con y sin caja contenedora y los resultados obtenidos para los test de desplazamiento por temperatura.

#### 3.4.1. Distribución de la temperatura sin caja de metrología

Seleccionando el modo de visualización en arcoíris de la cámara infrarroja es posible obtener la distribución de temperatura similar a la de los resultados obtenidos en el análisis FEA (ver Figura 3.29).

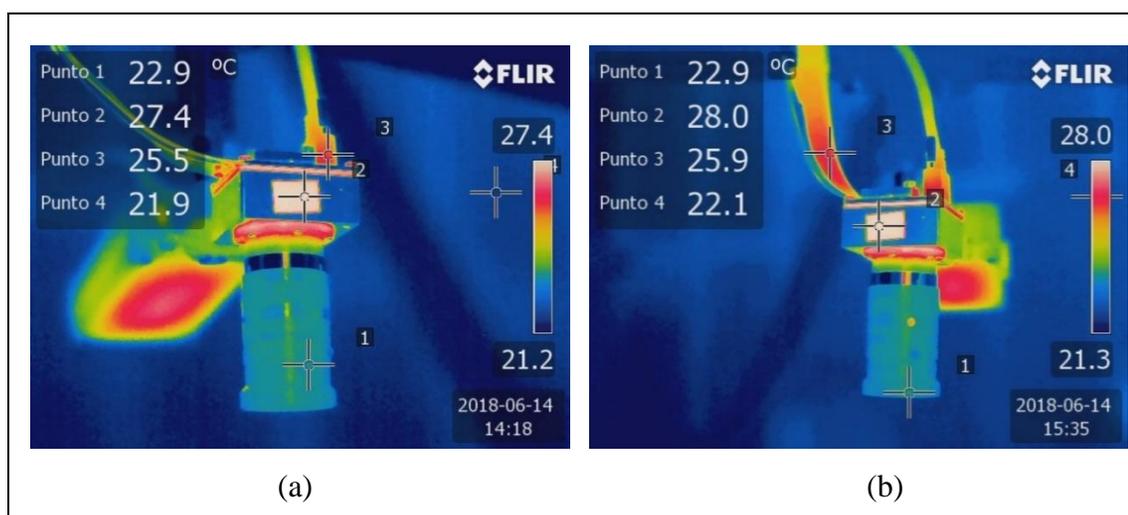


Figura 3.29 Fotografía infrarroja de la cámara de metrología. En la imagen “a” es observable la temperatura de los mismos tres puntos testeados para la cámara IDS UI-3590 CP Rev. 2. La imagen “b” muestra la temperatura de la banda térmica en conjunto con el cuerpo, objetivo y ambiente. En ambos casos, la mayor temperatura se encuentra en el cuerpo de la cámara (punto 2).

Es posible observar que el conector cámara-objetivo fabricado del polímero acetal funciona según lo esperado, presentando un gradiente de temperatura en donde se es mayor en el contacto con el cuerpo y menor hacia el sector del objetivo. Así mismo, es posible ver que el objetivo está alrededor de 1 °C sobre la temperatura ambiente. El cuerpo está aproximadamente a 28°C, siendo la mayor temperatura del sistema.

### 3.4.2. Distribución de temperatura con caja de metrología

Para este caso, se elige el mismo modo de visualización del test sin carcasa (ver Figura 3.30).



Figura 3.30 Fotografía infrarroja de la cámara de metrología en su caja contenedora montada en la estructura de aluminio. El punto 1 corresponde a la cara externa del objetivo, el punto 2 corresponde al cuerpo de la caja de metrología, el punto 3 y 4 corresponden al ambiente reflejado en dos superficies distintas.

Es posible notar que la temperatura ambiente (punto 4) es de 22.6°C y la temperatura alcanzada por el objetivo es de 23.2°C, siendo 0.6°C más caliente. La caja a su vez presenta una temperatura de 23°C (punto 2). El punto 3 corresponde al sector en contacto con el exterior (puerta), debido a esto presenta una menor temperatura.

### 3.4.3. Desplazamientos obtenidos en cuerpo sin pernos con resorte

Los resultados entregados por el código pueden observarse en la Figura 3.31.

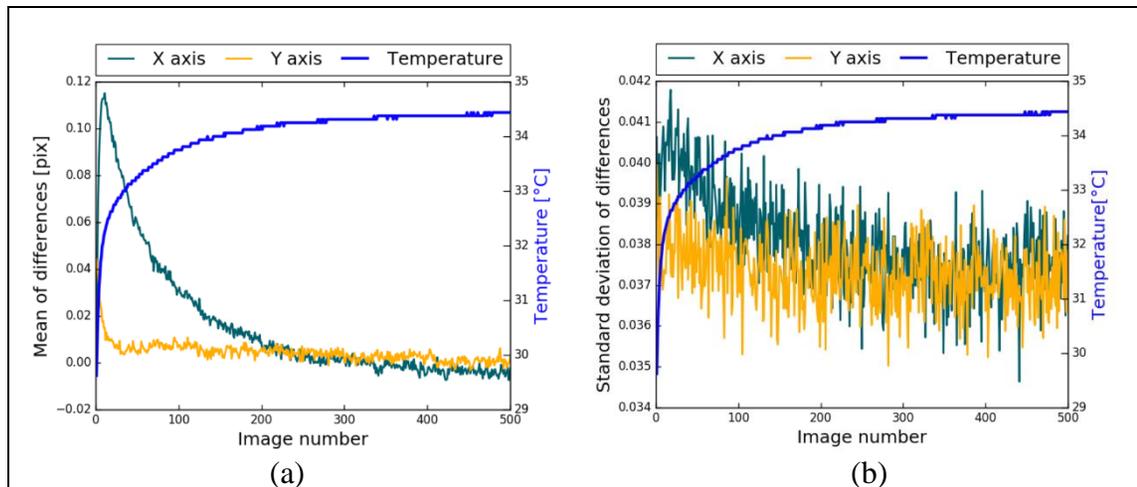


Figura 3.31 Promedio (a) y desviación estándar (b) obtenidos para la nueva cámara sin pernos con resorte.

El comportamiento que muestra la nueva cámara testeada sin los resortes es comparable al de la primera cámara ( $\sim 0.1$  pixel), pero con un menor calentamiento ( $\sim 5^\circ\text{C}$ ). Por lo que la adición de la disipación pasiva logra enfriar apropiadamente la cámara. Así mismo, es posible observar que es eficiente incrementando la temperatura desde  $30$  a  $32^\circ\text{C}$  ( $\sim 32$  imágenes equivalentes a 5 minutos). Esto permitiría una utilización de la función *pixel clock* hasta tal temperatura, ahorrar tiempo y consecuentemente presentar valores de desplazamientos menores.

### 3.4.4. Desplazamientos obtenidos en cuerpo con *plungers*

Los resultados para este caso son exhibidos en la Figura 3.32.

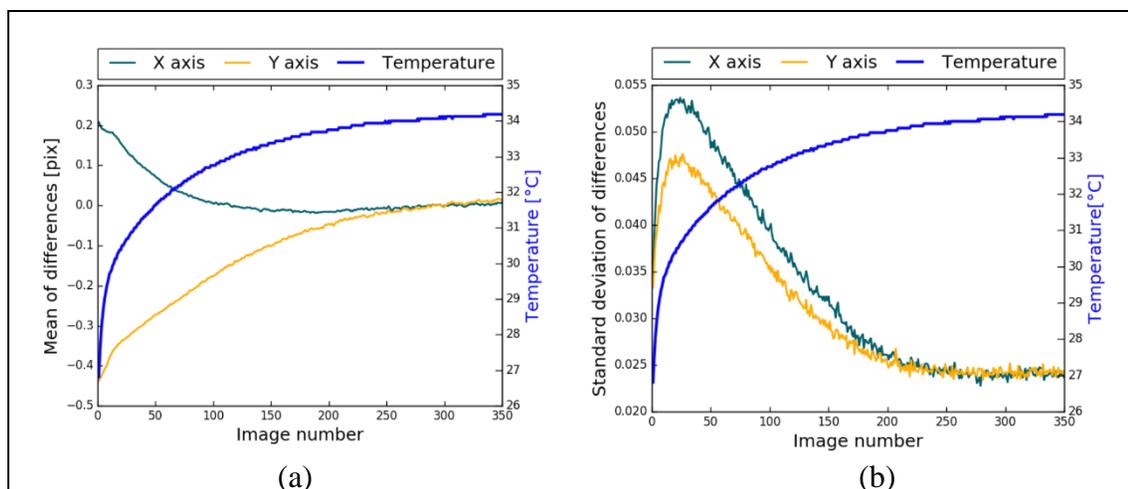


Figura 3.32 Promedio (a) y desviación estándar (b) obtenidos para la nueva cámara con resortes.

La Figura 3.32 muestra un promedio de desplazamientos en el detector que no es mejor que el primer caso (carcasa sin resortes), del orden de 0.2 píxeles en el eje X y 0.45 píxeles aproximadamente para el eje Y. De hecho, el resultado no es prometedor, ya que la cámara logró estabilizarse en temperatura y la curva del eje Y siguió de igual forma a la curva de la temperatura hasta el término de captura de las imágenes. La cámara se calentó alrededor de 8°C en todo el proceso.

#### 4. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En este trabajo de tesis se ha estudiado el problema de la instalación de fibras ópticas en el plano focal de telescopios y la medición de su posición, utilizando la técnica fotogramétrica, técnica que no había sido utilizada para medir desplazamientos o posición en estructuras opto-mecánicas para instrumentación astronómica en el rango óptico. Se analizaron en concreto dos instrumentos: el espectrógrafo de alta resolución FIDEOS y el espectrógrafo multi-objetos MOONS. En la Interfaz Telescopio-Instrumento de FIDEOS, fue posible medir su posición en cinco diferentes estados utilizando el sistema de fotogrametría comercial GSI, evidenciando sus potencialidades y debilidades en esta área de la ciencia. En la condición crítica ( $15^\circ$  de inclinación y 12 Kg) fue calculado su máximo desplazamiento en  $283 \mu\text{m}$ , siendo 8.5 veces mayor a lo establecido como tolerancia para el sistema y  $167 \mu\text{m}$  RMS, siendo 5 veces mayor a la tolerancia y 1.8 veces mayor a la condición “realista”. En el sistema de metrología y calibración de MOONS se logró optimizar el diseño de la carcasa de la cámara de metrología, mejorando la técnica fotogramétrica utilizada en este sistema, mediante el uso de materiales que favorecen la disipación de la temperatura presente en el detector hacia el medioambiente. A su vez, se analizó una montura opto-mecánica que compensa el desplazamiento del detector provocado por el efecto *warm up*, presentando una deformación máxima de  $2.5 \mu\text{m}$  situada en el board del detector y un promedio de desplazamiento en el detector de 0.2 micrones, equivalentes a  $15.15 \mu\text{m}$  en el plano focal. Se fabricó y testeó la nueva carcasa bajo el calentamiento del detector, donde la máxima temperatura encontrada en el objetivo fue de  $24.5^\circ\text{C}$ ,  $1^\circ\text{C}$  mayor al medio ambiente y  $6.6^\circ\text{C}$  menor al estado anterior. Se analizaron los desplazamientos de los targets en el detector para ambas configuraciones, obteniendo un promedio de 0.1 pixel en el mejor caso.

A continuación, son detallados otros aspectos importantes para cada caso:

## FIDEOS

- La Interfaz Telescopio-Instrumento sigue el comportamiento de una barra o viga bajo flexión dentro de su límite elástico, permitiendo conocer previamente cómo será su comportamiento bajo una carga mayor.
- La Interfaz Telescopio-Instrumento presenta algunos vectores de desplazamiento que difieren del comportamiento esperado y que muestran una posible rotación o movimiento debido a conexiones holgadas entre sus paredes y la estructura.
- No se comprueba la hipótesis de medir un máximo desplazamiento en la Interfaz Telescopio-Instrumento de 33 micrones.

## MOONS

- La versatilidad en la nueva carcasa de la cámara fabricada de diferentes materiales provee un correcto flujo de calor desde el detector hacia el exterior.
- La cámara cumple con el requerimiento impuesto de presentar un máximo de temperatura sobre el ambiente de 1°C, en función a la hipótesis planteada.
- El resultado en el test de desplazamientos para la cámara sin pernos con resorte muestra un comportamiento similar a la cámara IDS UI-3590 CP Rev. 2, pero evitando un aumento de temperatura excesivo.
- Teóricamente, la utilización de los pernos con resorte previene la expansión del detector, pero no muestra tal comportamiento en los test de desplazamientos.
- La solución propuesta para el sistema de metrología corresponde a la utilización de la función *pixel clock* en el rango de 26 a 32°C, tomando ventaja de la velocidad con la que la cámara permite aumentar su temperatura.

- Se ha demostrado que el cuerpo de Invar no restringe la expansión del detector, por lo que su uso no es indispensable.

#### 4.1. Trabajo futuro

- Han de realizarse más test fotogramétricos en la Interfaz Telescopio-Instrumento en un ambiente más controlado, considerando los siguientes aspectos:
  - Uniones óptimas entre cada parte que compone la Interfaz, reduciendo las holguras.
  - Adhesión de más targets en toda la interfaz, aumentando de esta forma la exactitud de las mediciones. Además, cubrir eventuales puntos parásitos.
  - Montura rígida de la *scale bar* en el telescopio, para generar una mejor estabilidad.
  - Capturar un mayor número de fotografías y de mejor calidad, considerando una iluminación adecuada y diferentes ángulos de toma.
  - Utilización de un sobrepeso montado mecánicamente a la interfaz.
  - Ubicar los puntos de referencia (ejes coordenados) en concordancia con los targets de la interfaz.
- Para seguir mejorando la eficiencia del sistema de disipación de calor de la cámara de metrología, se incluirá:
  - *Thermal strap* con mayor sección transversal, para mejorar la conducción.
  - Pequeños anillos de plástico que aíslen el detector del cuerpo de Invar.
  - Posibilidad de cambiar el material constituyente del cuerpo a Aluminio 6061, debido a su buen comportamiento como difusor térmico y su bajo costo.
  - Ejercer la misma presión sobre los cuatro pernos plásticos que sostienen el detector en el cuerpo de la cámara, distribuyendo el esfuerzo en cada esquina.

## BIBLIOGRAFÍA

- Ahmad, A. (1996). *Handbook of Optomechanical Engineering*. Boca Raton: CRC Press.
- Avila, G., & Guirao, C. (2009). Slit/pinhole Flux Calculator. Retrieved from <https://spectroscopy.wordpress.com/2009/05/22/slitpinhole-flux-calculator/>
- Bayar, M. (1979). Mechanical design aspects of optomechanical engineering. In P. R. Yoder, Jr. (Ed.), *Proc. SPIE Vol. 193 Optical Systems Engineering* (pp. 92–100). San Diego. <https://doi.org/10.1117/12.957876>
- Bely, P. (2003). *The Design and Construction of Large Optical Telescopes*. New York: Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/b97612>
- Cirasuolo, M., Afonso, J., Carollo, M., Flores, H., Maiolino, R., Oliva, E., ... Zoccali, M. (2014). MOONS: the Multi-Object Optical and Near-infrared Spectrograph for the VLT. In S. K. Ramsay, I. S. McLean, & H. Takami (Eds.), *The Messenger* (Vol. 145, p. 91470N). <https://doi.org/10.1117/12.2056012>
- Cloud Compare. (n.d.). Retrieved from <http://www.danielgm.net/cc/>
- Dauvin, L., Drass, H., Vanzi, L., Dunner, R., Torres, M., Bechet, C., ... Shen, T.-S. (2017). Optimization of Temperature, Targets, and Illumination for High Precision Photogrammetric Measurements. *IEEE Sensors Journal*, *PP*(99), 1–1. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2017.2777940>
- DePoy, D. L., Allen, R., Barkhouser, R., Boster, E., Carona, D., Harding, A., ... Villanueva, S. (2012). GMACS: a wide field, multi-object, moderate-resolution, optical spectrograph for the Giant Magellan Telescope. In I. S. McLean, S. K. Ramsay, & H. Takami (Eds.) (p. 84461N). <https://doi.org/10.1117/12.926186>
- Drass, H., Vanzi, L., Torres-Torriti, M., Dünner, R., Shen, T.-C., Belmar, F., ... Fairley, A. (2016). Implementation and performance of the metrology system for the multi-object optical and near-infrared spectrograph MOONS. In C. J. Evans, L. Simard, & H. Takami (Eds.), *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy VI* (Vol. 9908, p. 99088E). <https://doi.org/10.1117/12.2232654>
- Eikenberry, S., Andersen, D., Guzman, R., Bally, J., Cuevas, S., Fletcher, M., ... Ziegert, J. (2006). IRMOS: The near-infrared multi-object spectrograph for the TMT. In I. S. McLean & M. Iye (Eds.) (p. 62695W). <https://doi.org/10.1117/12.672266>
- ESO. (n.d.). The VLT 8.2-meter Unit Telescopes. Retrieved from <https://www.eso.org/sci/facilities/paranal/telescopes/ut.html>

- Fischer, R. E., Tadic-Galeb, B., & Yoder, P. R. (2008). *Optical System Design* (2nd ed.). New York: McGraw-Hill. <https://doi.org/10.1036/0071472487>
- Flores, M. (2014). *Diseño de la interface de calibración de un espectrógrafo de alta resolución*. Universidad de Santiago de Chile.
- Gillingham, P. R., Miziarski, S., & Klauser, U. (2000). Mechanical features of the OzPoz fiber positioner for the VLT. In M. Iye & A. F. M. Moorwood (Eds.) (p. 914). <https://doi.org/10.1117/12.395411>
- Guinouard, I., Lee, D., Schnetler, H., Taylor, W., Amans, J.-P., Montgomery, D., & Oliva, E. (2014). Development of the fibres of MOONS. In R. Navarro, C. R. Cunningham, & A. A. Barto (Eds.) (p. 91514S). <https://doi.org/10.1117/12.2054735>
- Hammer, F., Morris, S., Kaper, L., Barbuy, B., Cuby, J. G., Roth, M., ... Rodrigues, M. (2016). The E-ELT multi-object spectrograph: latest news from MOSAIC. In C. J. Evans, L. Simard, & H. Takami (Eds.) (p. 990824). <https://doi.org/10.1117/12.2232427>
- Handel, H. (2007). Analyzing the Influences of Camera Warm-Up Effects on Image Acquisition. In Y. Yagi, S. B. Kang, I. S. Kweon, & H. Zha (Eds.), *Computer Vision – ACCV 2007* (Vol. 4844, pp. 258–268). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-76390-1\\_26](https://doi.org/10.1007/978-3-540-76390-1_26)
- Haynes, R., Barden, S., de Jong, R., Schnurr, O., Bellido, O., Walcher, J., ... Ansorge, W. (2014, July 24). The 4MOST instrument concept overview. (S. K. Ramsay, I. S. McLean, & H. Takami, Eds.), *Proc. SPIE*. <https://doi.org/10.1117/12.2057253>
- Heacox, W. D. (1986). On the application of optical-fiber image scramblers to astronomical spectroscopy. *The Astronomical Journal*, 92, 219. <https://doi.org/10.1086/114154>
- Hearnshaw, J. (2009). *Astronomical Spectrographs and their History*. Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511735288>
- Hecht, E. (2017). *Optics*. Harlow: Pearson.
- Hill, J. M. (2001). MX Spectrometer Information. Retrieved from <http://abell.as.arizona.edu/~hill/mxspec/>
- Hill, J. M., Angel, J. R., & Richardson, E. H. (1984). Optical Matching For Fiber Optic Spectroscopy. In A. Boksenberg & D. L. Crawford (Eds.) (pp. 85–92). <https://doi.org/10.1117/12.966130>
- Huang, Y. De, Raffin, P., Chen, M.-T., Altamirano, P., & Oshiro, P. (2008). Photogrammetry measurement of the AMiBA 6-meter platform. In L. M. Stepp & R.

Gilmozzi (Eds.), *Proc. of SPIE Vol. 7012 Ground-based and Airborne Telescopes II* (p. 70122H). <https://doi.org/10.1117/12.786811>

Hunter, T. R. & Ramsey, L. W. (1992). Scrambling properties of optical fibers and the performance of a double scrambler. *Astronomical Society of the Pacific, Publications, 104*, 1244–1251.

Inventor Professional Student Version. (n.d.).

James, D. (2011). Hydra Optical Spectrograph. Retrieved May 31, 2018, from <http://www.ctio.noao.edu/noao/content/Hydra>

Jiang, S., Yang, L., Xu, J., & Yu, J. (2013). Deformation measurement for satellite antenna by close-range photogrammetry. In D. A. Huckridge & R. Ebert (Eds.), *Proc. SPIE Vol. 8896 Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications X* (p. 88960W). <https://doi.org/10.1117/12.2027507>

Kaufer, A., & Pasquini, L. (1998). FEROS: the new fiber-linked echelle spectrograph for the ESO 1.52-m telescope. In S. D’Odorico (Ed.) (pp. 844–854). <https://doi.org/10.1117/12.316798>

Lamontagne, F., & Desnoyers, N. (2016). *US 9,244,245 B2*. Canada.

Majewski, S. (2017). Telescope Optics III: Modern Telescopes.

MatLab R2017a. (n.d.).

Pappa, R. S., Giersch, L. R., & Quagliaroli, J. M. (2001). PHOTOGRAMMETRY OF A 5M INFLATABLE SPACE ANTENNA WITH CONSUMER-GRADE DIGITAL CAMERAS. *Experimental Techniques*, 25(4), 21–29. <https://doi.org/10.1111/j.1747-1567.2001.tb00028.x>

Pasquini, L., Avila, G., Blecha, A., Cacciari, C., Cayatte, V., Colless, M., ... Zoccali, M. (2002). Installation and commissioning of FLAMES, the VLT Multifibre Facility. *The Messenger*, 110(110), 1–9. <https://doi.org/10.1117/12.458915>

Pepe, F. A., Cristiani, S., Rebolo Lopez, R., Santos, N. C., Amorim, A., Avila, G., ... Zerbi, F. (2010). ESPRESSO: the Echelle spectrograph for rocky exoplanets and stable spectroscopic observations. In I. S. McLean, S. K. Ramsay, & H. Takami (Eds.) (p. 77350F). <https://doi.org/10.1117/12.857122>

Pepe, F., Mayor, M., Delabre, B., Kohler, D., Lacroix, D., Queloz, D., ... Sivan, J.-P. (2000). HARPS: a new high-resolution spectrograph for the search of extrasolar planets. In M. Iye & A. F. M. Moorwood (Eds.) (p. 582). <https://doi.org/10.1117/12.395516>

- Ramsey, L. W., & Huenemoerder, D. P. (1986). A Versatile Fiber Coupled CCD/Echelle Spectrograph System. In D. L. Crawford (Ed.) (p. 282). <https://doi.org/10.1117/12.968102>
- Robson, S., Clarke, T. A., & Chen, J. (1993). The suitability of the Pulnix TM6CN CCD camera for photogrammetric measurement. In S. F. El-Hakim (Ed.) (pp. 66–77). <https://doi.org/10.1117/12.162137>
- Sánchez, B., Keiman, C., Fuentes-Fernández, J., Cuevas, S., Espejo, C., Chapa, O., ... Garcés, L. (2017). Cryogenic application of an autocentering mount working at the diffraction limit. *Optical Engineering*, 56(3), 34114. <https://doi.org/10.1117/1.OE.56.3.034114>
- Schenk, T. (2005). Introduction to Photogrammetry.
- Smith, M. J., & Cope, E. (2010). The Effects of Temperature Variation on Single-Lens-Reflex Digital Camera Calibration Parameters, XXXVIII. Retrieved from <http://www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/part5/papers/158.pdf>
- Szentgyorgyi, A. H., Furesz, G., Cheimets, P., Eng, R., Fabricant, D. G., Geary, J. C., ... Roll, Jr., J. B. (2011). Hectoechelle: a multiobject echelle spectrograph for the MMT. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 123, 1188–1209.
- Tala, M., Berdja, A., Jones, M., Vanzi, L., Ropert, S., Flores, M., & Viscasillas, C. (2014). FIDEOS: a high resolution echelle spectrograph for the ESO 1m telescope at La Silla. In S. K. Ramsay, I. S. McLean, & H. Takami (Eds.), *Proc. SPIE Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy V* (p. 914789). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.2056551>
- Tamura, N., Takato, N., Shimono, A., Moritani, Y., Yabe, K., Ishizuka, Y., ... Yasuda, N. (2016). Prime Focus Spectrograph (PFS) for the Subaru telescope: overview, recent progress, and future perspectives. In C. J. Evans, L. Simard, & H. Takami (Eds.), *Proc. SPIE* (Vol. 9908, p. 99081M). <https://doi.org/10.1117/12.2232103>
- Taylor, W., Cirasuolo, M., Alfonso, J., Carollo, M., Evans, C., Flores, H., & Maiolino, R. (2018). Rising MOONS: an update on the VLT's next multi-object spectrograph as it begins to grow. In *Proc. SPIE Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy*. SPIE.
- Torres-Torriti, M., Vanzi, L., Dünner, R., Belmar, F., Dauvin, L., Chen, T.-C., ... Cabral, A. (2014). The metrology system for the multi-object optical and near-infrared spectrograph MOONS. In S. K. Ramsay, I. S. McLean, & H. Takami (Eds.), *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering* (Vol. 9147, p. 91478M). <https://doi.org/10.1117/12.2055686>

- V-STARS/N. (n.d.). V-STARS/N. GSI. Retrieved from <https://www.geodetic.com/f.ashx/BROCHURES/V-STARS-N-Brochure.pdf>
- Vanzi, L., Chacon, J., Helminiak, K. G., Baffico, M., Rivinius, T., Štefl, S., ... Guirao, C. (2012). PUCHEROS: a cost-effective solution for high-resolution spectroscopy with small telescopes. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 424(4), 2770–2777. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2012.21382.x>
- Vanzi, L., Zapata, A., Flores, M., Brahm, R., Tala Pinto, M., Rukdee, S., ... Espinoza, N. (2018). Precision stellar radial velocity measurements with FIDEOS at the ESO 1-m telescope of La Silla. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 477(4), 5041–5051. <https://doi.org/10.1093/mnras/sty936>
- West, R. (1991). VLT Main Structure To Be Built in Italy. *ESO EPR Dept.* Retrieved from <https://www.eso.org/public/news/eso9108/>
- Wong, K. W. (1990). Experience with two vision systems. In *Close-Range Photogrammetry Meets Machine Vision* (p. 2). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.2294245>
- Yoder, P. R. (2008). *Mounting Optics in Optical Instruments. Mounting Optics in Optical Instruments*. 1000 20th Street, Bellingham, WA 98227-0010 USA: SPIE. <https://doi.org/10.1117/3.785236>
- Yu, Q., Chao, Z., Jiang, G., Shang, Y., Fu, S., Liu, X., ... Liu, H. (2014). The effects of temperature variation on videometric measurement and a compensation method. *Image and Vision Computing*, 32(12), 1021–1029. <https://doi.org/10.1016/j.imavis.2014.08.011>