



**UNIVERSIDAD
DE GRANADA**

**PANIC, UNA CÁMARA INFRARROJA DE GRAN
CAMPO PARA EL OBSERVATORIO DE CALAR ALTO**

M. Concepción Cárdenas Vázquez

Programa de Doctorado en Física y Ciencias del Espacio



**UNIVERSIDAD
DE GRANADA**

FACULTAD DE CIENCIAS. DEPARTAMENTO DE ÓPTICA.



**INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE ANDALUCÍA
CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS**

Programa de Doctorado en Física y Ciencias del Espacio (B09.56.1)

PANIC, UNA CÁMARA INFRARROJA DE GRAN CAMPO PARA EL OBSERVATORIO DE CALAR ALTO



Dirigida por
Dr. Julio F. Rodríguez Gómez (IAA-CSIC)

Memoria presentada por
D^a M. Concepción Cárdenas Vázquez
Para aspirar al grado de Doctor
Granada, Octubre 2018

Editor: Universidad de Granada. Tesis Doctorales
Autor: María Concepción Cárdenas Vázquez
ISBN: 978-84-1306-046-0
URI: <http://hdl.handle.net/10481/54456>

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero expresar mi agradecimiento a mi director de tesis doctoral, el Dr. Julio F. Rodríguez Gómez, por haber apostado por mí para este trabajo. Gracias por tu tiempo, por tus consejos, por tu enorme paciencia a lo largo de todos estos años en los que, por las andaduras de la vida, nunca tenía tiempo de terminar mi memoria de tesis, y en definitiva, por haberte dejado meterte en este "fregao".

Asimismo a mi tutor en el departamento de Óptica de la UGR, el Dr. Manuel Rubiño López, que con toda su bondad aceptó ser mi tutor y que me ha apoyado todos estos años.

A José Miguel Ibáñez y Antonio García, por ese apoyo continuo en la toma de imágenes y luego la reducción de los datos, especialmente esas reducciones para la determinación del plano focal en telescopio. Cuántas imágenes, cuántas noches en vela tratando imágenes y midiendo estrellas en todo el campo... Y luego, José Miguel, toda la lata que te he dado para los resultados del comisionado.

De una manera muy especial quiero agradecer a todos los miembros del equipo de PANIC, ya que gracias al trabajo conjunto hemos llevado a cabo este proyecto, sin el que esta tesis no existiría. Gracias a los investigadores principales del proyecto, Josef W. Fried, que en paz descansa, y Matilde Fernández, por permitirme realizar mi tesis con este instrumento. A Peter Bizenberger por su resolución y su carácter colaborativo, al Dr. Bernhard Dorner por su compromiso y responsabilidad, a Armin Huber por su constancia, a Ernesto Sánchez-Blanco por su enfoque y optimismo y a Irene Ferro Rodríguez por tantas horas en el laboratorio juntas.

A la Dra. Silvia Scheithauer, mi ahora gerente de proyecto en METIS, por todo lo que me ha apoyado este último año dándome el empujón final que me faltaba y revisando mis progresos semanalmente.

A los que me rodean, sin su apoyo nunca habría podido terminar de escribir esta memoria. Gracias a todos de los que seguro que me he "olvidao". A todos, muchas gracias.

RESUMEN

En la presente Memoria de Tesis Doctoral se presenta el estudio teórico, el diseño óptico, la construcción y la verificación de PANIC, una cámara infrarroja de gran campo para los telescopios de 2.2 m y 3.5 m de apertura del Observatorio de Calar Alto (Almería, España).

Se expone el desarrollo del diseño óptico desde el inicio del proyecto, incluyendo la recogida y traslación de los requerimientos a parámetros ópticos, y siguiendo las distintas etapas de diseño hasta el diseño final. Asimismo se describe el proceso de ensamblaje, integración y verificación del instrumento en laboratorio y el ajuste y su verificación una vez instalado en el telescopio. Además se comparan las prestaciones del diseño con las obtenidas en los telescopios tras los primeros resultados conseguidos durante la fase de comisionado del instrumento.

Dicha cámara infrarroja abarca un campo de visión de (30×30) arcmin en el telescopio de 2.2 m de apertura y de (15×15) arcmin en el telescopio de 3.5 m, con un muestreo del mismo de (4096×4096) píxeles de $18 \mu\text{m}$. El rango espectral de trabajo es el infrarrojo cercano, cubriendo desde 0.8 a $2.5 \mu\text{m}$ en longitud de onda, para las bandas espectrales desde la **Z** a la **K_s**. También puede trabajar con filtros estándares estrechos (llegando hasta un ancho de banda de paso del 1% de la longitud de onda central del filtro). La cámara opera acoplada al foco *Cassegrain* de estos telescopios.

El extenso campo de visión requerido en el telescopio de 2.2 m de apertura, así como el rango espectral deseado, comprende varios retos importantes. En primer lugar ha habido que afrontar el desafío del diseño de lentes de gran tamaño, la optimización de un sistema con aberraciones muy severas fuera de eje (en particular, astigmatismo y curvatura de campo) y, a la par, la minimización de las aberraciones cromáticas debido al amplio rango espectral. En segundo lugar, al trabajar acoplada al foco *Cassegrain* del telescopio, nace el reto de doblar el camino óptico para empaquetar el instrumento dentro de la envolvente física permisible para esta condición de operación.

Además, PANIC es un instrumento criogénico, siendo sus condiciones de operación 95 K de temperatura y condiciones de vacío ($\sim 10^{-6}$ mbar), mantenidas gracias a un criostato enfriado por nitrógeno líquido. La causa por la que las condiciones de funcionamiento del instrumento son tan extremas está relacionada con el rango espectral de trabajo y por el tipo de detector. El detector requiere esas temperaturas para obtener una relación señal ruido máxima, mientras que la minimización de la radiación de fondo térmico que llegue al detector, en particular en la banda **K**, requiere el enfriamiento de todo el camino óptico y del bloqueo de todo objeto caliente externo al campo de interés.

Las prestaciones del instrumento, como son la escala de placa, el campo de visión, la calidad de imagen y la distorsión en todo el campo, medidos en ambos telescopios, confirman que PANIC cumple los requerimientos exigidos/perseguidos por lo que cabe esperar que las observaciones que se realicen con este instrumento puntero de la astronomía mundial, permita realizar estudios de primera calidad a la comunidad astronómica internacional.

CONTENIDOS

Agradecimientos	1
Resumen.....	3
Contenidos	5
1. Introducción	7
2. Objetivos.....	13
3. Requerimientos y Especificaciones	15
3.1. Definiciones y Ecuaciones básicas	15
3.2. Requerimientos de Alto Nivel.....	22
3.3. Especificaciones del Sistema	25
3.4. Otros requerimientos	27
3.5. Especificaciones Detalladas	27
4. Desarrollo y Diseño de PANIC.....	31
4.1. Desarrollo del Sistema Óptico.....	31
4.1.1. Las Fases del Diseño Óptico de PANIC	31
4.1.2. El Planteamiento del Diseño Óptico	31
4.1.3. El Sistema Óptico inicial.....	33
4.1.4. Modelización del Sistema Óptico	35
4.1.5. Optimización del Sistema Óptico	37
4.1.6. La Evaluación del Sistema Óptico	39
4.1.7. Presupuesto de Errores.....	41
4.2. Fase de Diseño Óptico Preliminar.....	42
4.2.1. El Diseño Óptico Preliminar	42
4.2.2. Revisión de PDR e Informe del panel de revisores	50
4.3. Fase de Diseño Óptico Final	51
4.3.1. Diseño Óptico Final	53
4.3.2. Revisión de FDR de Óptica e Informe del panel de revisores.....	64
5. Implementación y Verificación de PANIC.....	65
5.1. Fase de Fabricación y Aceptación de los distintos subsistemas.....	65
5.1.1. Lentes y Ventana de entrada del criostato.....	67
5.1.2. Espejos de Doblado.....	75
5.1.3. Filtros de ciencia	82
5.1.4. Lente de Reimaginación de Pupila	84
5.1.5. Sistemas Auxiliares diseñados para PANIC	86
5.2. Fase de Alineado, Integración y Pruebas de ingeniería finales en Laboratorio ...	91
5.2.1. Estructura de Espejos de doblado.....	92
5.2.2. Lentes y Filtros	95
5.2.3. Barriles de Lentes	99
5.2.4. Eje Opto-mecánico.....	103
5.2.5. Alineado del Instrumento completo	109
5.2.6. Ajuste del Mosaico de detectores	113
5.2.7. Pruebas finales de laboratorio antes de Transporte.....	117
5.2.8. Desensamblado y Transporte a CAHA	121

5.3.	Fase de Alineado y Verificación de PANIC en ambos Telescopios de CAHA	122
5.3.1.	Pruebas de laboratorio después del Transporte	122
5.3.2.	Montaje y Ajuste en el T22	124
5.3.3.	Montaje y Ajuste en el T35	131
6.	Resultados y Análisis de Prestaciones.....	135
6.1.	Sistema Construido	135
6.1.1.	Sistema Óptico	135
6.1.2.	Filtros de Ciencia	137
6.2.	Calidad Óptica en Laboratorio	139
6.3.	Comisionado en ambos Telescopios	141
6.4.	Discusión de Resultados.....	148
7.	Conclusiones.....	151
	Bibliografía.....	155
	Referencias	155
	Lista de Abreviaturas y Acrónimos	159
	Lista de Imágenes.....	161
	Lista de Tablas	167
	Apéndices	171
A.	Mosaico de detectores: HAWAII-2RG	173
B.	Modelos Ópticos de los Telescopios: T22 y T35.....	177
B.1.	T22	179
B.2.	T35	182
C.	Diseños Ópticos de PANIC	185
C.1.	Consideraciones y Parámetros comunes.....	185
C.1.1.	Modo Científico	186
C.1.2.	Modo de Reimaginación de Pupila.....	188
C.1.3.	Resultados de Prestaciones y Cálculo de Errores	189
C.2.	Modelo Óptico FDR.....	190
C.3.	Modelo Óptico en Fabricación	195
C.4.	Modelo Óptico Construido	197
D.	El Simulador de Estrella de PANIC	203
D.1.	Diseño Óptico del SS	203
D.2.	Prestación esperada por el SS	209
E.	Instrumentos de Medida en laboratorio	211
E.1.	Autocolimador: ELCOMAT 3000.....	211
E.2.	Espectrofotómetro: UV/VIS/NIR Varian.....	211
E.3.	Interferómetro: μ Phase [®] FST H100.....	211
E.4.	Telescopio de micro-alineamiento: MAT <i>Taylor Hobson</i>	212
F.	Línea de Trabajo del Proyecto	213

1. INTRODUCCIÓN

PANIC (PANIC Panoramic Near-Infrared Camera) (Cárdenas Vázquez, et al., 2018) es la nueva cámara infrarroja de gran campo para los telescopios de 2.2 m (T22) y 3.5 m (T35) de apertura del Observatorio Astronómico Hispano-Alemán de Calar Alto (Almería, España). Este proyecto ha sido desarrollado en colaboración entre el Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA, en Granada, España) y el *Max-Planck-Institut für Astronomie* (MPIA, en Heidelberg, Alemania).

En 2004 se firma el convenio entre el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y la sociedad alemana *Max-Planck-Gesellschaft* (MPG) por el que ambas organizaciones gozan de la propiedad y la gestión al 50 % del Centro Astronómico Hispano-Alemán de Calar Alto, Agrupación de Interés Económico (CAHA, AIE) y, en particular de sus dos telescopios de 2.2 y 3.5 m de apertura.

Dentro de este acuerdo el CSIC y la MPG, a través de sus respectivos institutos IAA y MPIA, se comprometen a llevar a cabo un programa de desarrollo conjunto de nuevos instrumentos post-focales de última generación para CAHA.

El IAA y el MPIA son institutos de investigación en Astrofísica, Ciencias del Espacio y tecnologías asociadas al desarrollo de instrumentación astronómica tanto en tierra como en espacio.

En septiembre de 2005 el Comité de Instrumentación de CAHA emite su recomendación definitiva con respecto al primer instrumento a desarrollar dentro de este convenio: la construcción de una cámara infrarroja para el T22, en el rango espectral de 0.9 a 2.5 μm con una escala de píxel de 0.45 arcsec/px, que iría acoplada a su foco *Cassegrain*, para así dotar a este telescopio con un instrumento de primera categoría y disminuir la presión de petición de tiempos sobre el T35. Para hacer un instrumento competitivo, la cámara deberá tener un gran campo usando un mosaico de 4 detectores de 2k \times 2k píxeles. La cámara sería de propósito general siendo sus principales aplicaciones científicas la obtención de imágenes de gran campo y mapeado del cielo.

Este nuevo instrumento, por un lado, vendría a sustituir a la cámara **MAGIC** (Herbst, et al., 1993) construida en 1993, de 256 \times 256 píxeles, para en el rango infrarrojo de 1 a 2.5 μm , que cubría un campo de visión de 7 \times 7 arcmin en el T22 con una escala de píxel de 1.62 arcmin/pix (Imagen 1-1). Por otro lado, la nueva cámara tendría una pupila fría interna para ser más sensible y tener mejor relación señal-ruido en la banda **K** que la cámara **Omega 2000** (Baumeister, et al., 2002) del T35. Además la nueva cámara tendría cuatro veces más campo de visión que Omega 2000, con igual escala de píxel (Imagen 1-1).

En este contexto los institutos IAA y MPIA, en colaboración conjunta, realizan un estudio de viabilidad sobre posibles instrumentos que cumplieran estos requisitos atendiendo a la ciencia que irían dirigidos. En dicho estudio de viabilidad se presentaron tres potenciales soluciones que abarcaban todo el campo de visión accesible en el T22. Dichas soluciones, todas ellas tipo refractivo, fueron:

a) Un diseño con cuatro brazos, cada uno de ellos dirigido a un detector de $2k \times 2k$.

En este diseño se consideraba un espacio entre detectores tal que es posible la adición de un quinto brazo localizado en el centro de los anteriores para hacer observaciones multi-banda simultáneas mediante diversos dicroicos.

b) Un diseño con cuatro brazos dirigido cada uno a un detector de $2k \times 2k$, con el espacio mínimo necesario entre detectores.

c) Un diseño monobrazo en el que se cubría todo el campo con un detector de $4k \times 4k$.

En julio de 2006, el Comité Científico Asesor de CAHA, tras considerar el interés científico de las tres soluciones, su viabilidad, las posibles causas de retraso en el desarrollo del proyecto, el nicho que ese tipo de instrumento ocuparía con respecto a sus posibles competidores y tras consultar con asesores externos, concluyó que se construyese la solución c), denominada "monobrazo", tal que fuese capaz de operar tanto con filtros de banda de paso anchos como estrechos. Así, ese mismo mes se comenzaron los trabajos para el primer instrumento, la cámara infrarroja PANIC ya referida.

En la Imagen 1-1 se presentan esquemáticamente los campos de visión y las escalas de píxel para los instrumentos infrarrojos de CAHA. A la izquierda, los del T22 y, a la derecha, los del T35. En el T22 se muestran la antigua, y ya decomisionada, cámara **MAGIC** (Herbst, et al., 1993) en sus dos modos de operación (verde oscuro), en comparación con la nueva cámara **PANIC** (verde claro). En el T35 se muestra la también decomisionada **Omega Cass** (Lenzen, Bizenberger, Salm, & Storz, 1998) (en magenta), **Omega 2000** (Kovacs, Mall, Bizenberger, Baumeister, & Roser, 2004) (en naranja claro) y **PANIC** (en rojo).

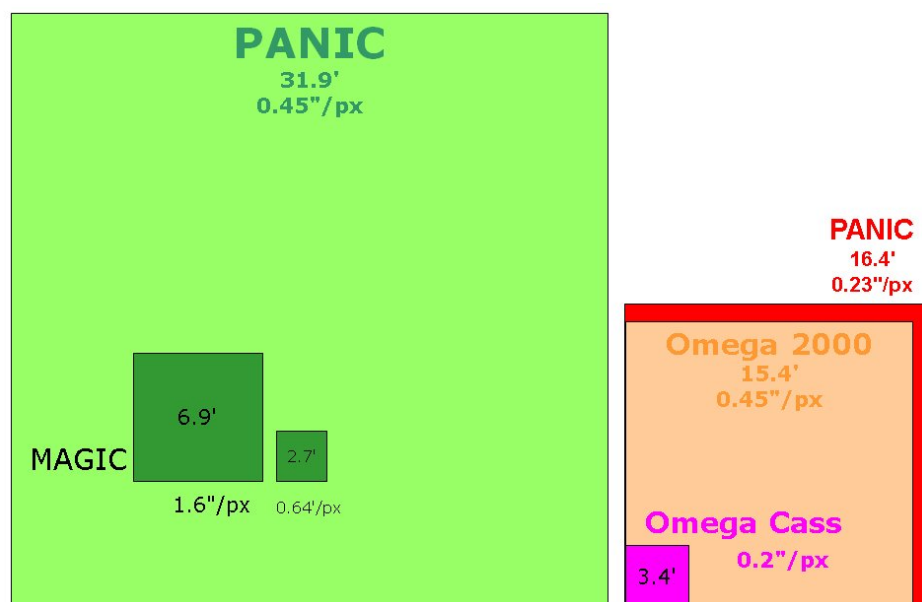


Imagen 1-1: Campos de visión y escalas de píxel de las diferentes cámaras infrarrojas de CAHA. A la izqda. en el T22 y a la dcha. en el T35.

El IAA ha sido responsable de los paquetes de óptica y software de la cámara, y el MPIA de los paquetes de criogenia, detectores, electrónica y mecánica.

El desarrollo de esta cámara es el primer gran proyecto de desarrollo completo de instrumentación astronómica en tierra del IAA para CAHA, con el valor añadido de tratarse

de una cámara infrarroja, más aún cuando la Astronomía actual tiende a la adquisición de datos en este rango espectral donde son necesarias las técnicas criogénicas para el desarrollo de dicha instrumentación.

La concepción de este instrumento, respondiendo a las necesidades actuales de la astrofísica, pertenece a la nueva generación de cámaras infrarrojas de gran campo para telescopios terrestres. Existen otras cámaras de este tipo en telescopios de apertura menor a 4 m que podrían ser competidores de esta cámara, y son: NEWFIRM (NEWFIRM-NOAO Extremely Wide Field Infrared Imager) en los telescopios de 4 m de apertura del *National Optical Astronomy Observatory* (NOAO); WFCAM (WFCAM - The UKIRT Wide Field Camera) en UKIRT (*United Kingdom Infra-Red Telescope*); y WIRCAM (Wide-field InfraRed Camera) (*Wide-field InfraRed CAMera*) en el CFHT (*Canada-France-Hawaii Telescope*).

En la siguiente Tabla 1–1 se muestran sus detalles. Todas ellas están dedicadas a programas específicos de mapeado de cielo. En el momento de la definición de PANIC en el hemisferio norte se encuentra en operación Omega 2000, y planeadas NEWFIRM, WFCAM, WIRCAM. NEWFIRM con posibilidad de operar también en el hemisferio sur.

Sin embargo, PANIC es la única cámara infrarroja con gran campo de visión en el hemisferio norte que pertenezca a la comunidad astronómica hispano-germana y abierta a toda la comunidad astronómica.

Además, incorpora sus propias características específicas, como son: posee el mayor campo de visión de este tipo de instrumentos, incluye la banda fotométrica **Z**, una relación señal-ruido muy baja en la banda **K**, capacidad para operar con filtros estrechos, y la posibilidad de trabajar en el T35 con una escala de píxel que dobla su resolución espacial con un gran campo de visión, para esta escala de píxel es el único instrumento que existe. Estas particularidades la hacen única dentro del restringido número de instrumentos que de este tipo existen en la actualidad. Esto permitirá abordar proyectos científicos novedosos y originales a toda la comunidad científica internacional, y en particular, a la comunidad astronómica hispano-alemana, ya que ésta tiene acceso prioritario a tiempo de telescopio, que normalmente no son posibles en otros observatorios.

Instrumento	Rango Espectral (μm)	Escala de píxel (arcsec/pix)	FoV (arcmin ²)	Comienzo operación	Telescopio / Localización	Comunidad científica
NEWFIRM	1-2.4	0.4	745 (28×28)	2010	Mayall (4 m) / Kitt Peak (USA) Blanco (4 m) / Cerro Tololo (Chile)	Estados Unidos
WFCAM	1-2.5	0.4	745 (28×28)	2005	UKIRT (3.8 m) / Hawái (USA)	Estados Unidos, Hawái y NASA
WIRCAM	0.9-2.5	0.3	420 (21.5×21.5)	2006	CFHT (3.6 m) / Hawái (USA)	Canadá Francia Hawái
Omega 2000	0.8-2.4	0.45	237 (15.4×15.4)	2003	CAHA (3.5 m) / Almería (España)	Alemania España
PANIC	0.8-2.5	0.45	945 (30.7×30.7)	2015	CAHA (2.2 m) / Almería (España)	Alemania España
		0.23	245 (15.6×15.6)		CAHA (3.5 m) / Almería (España)	

Tabla 1–1: Cámaras infrarrojas de gran campo actualmente en operación.

Este trabajo de tesis, gracias a esta instrumentación y la tecnología aparejada, contribuye a mantener el liderazgo en el desarrollo de instrumentación astronómica que posee el Observatorio de Calar Alto y, por tanto, también a actualizar el valor científico de sus instalaciones telescópicas.

Tras la decisión, ya mencionada, del Comité Científico Asesor en 2006, la doctoranda es nombrada por el IAA responsable de paquete de trabajo de Óptica y ha sido la responsable del paquete desde la génesis de PANIC hasta su comisionado en ambos telescopios, que terminó en la primavera de 2015. La doctoranda también participó en el estudio de viabilidad que se realizó para este instrumento, siendo entonces responsable de las soluciones a) y b) presentadas.

Durante este proceso de desarrollo de este instrumento la doctoranda ha realizado el diseño óptico preliminar de PANIC explorado diversas soluciones, no solo para su uso en fotometría, sino también para las utilidades de las que se deseaba dotar a la cámara, como por ejemplo, polarimetría. Dicho diseño fue evaluado positivamente en una revisión denominada *Preliminary Design Review (PDR)* en noviembre de 2007. En este punto, que demuestra la completa viabilidad técnica del instrumento, las tres instituciones implicadas (CAHA, IAA y MPIA) firman un Documento de acuerdo (MoU, del inglés *Memorandum of Understanding*) mediante el cual CAHA establece los requerimientos técnicos y el procedimiento de aceptación del instrumento.

En la siguiente fase del proyecto, la doctoranda realizó el diseño óptico final, con todos los estudios (que se detallan en el capítulo 4 de esta memoria) y asimismo fue evaluado favorablemente en octubre de 2008, en la denominada revisión de diseño final (*Final Design Review, FDR*). El paso de dicho hito dio entonces, luz verde a la construcción del instrumento, adquisición de componentes, verificación de los mismos y alineado en laboratorio del instrumento, fases que se extendieron hasta la primavera de 2014. El instrumento fue entregado al observatorio en el otoño de 2014 procediendo a su instalación y su verificación, primero en el T22 y en la primavera del 2015 en el T35.

El pasado noviembre de 2017, el director del Observatorio de Calar Alto y los investigadores principales de PANIC firmaron un acuerdo sobre la aceptación provisional del instrumento PANIC. En este acuerdo se explica que, salvo los detectores, todos los paquetes del instrumento, Óptica, Mecánica, Software de control y Software de procesamiento de datos, han cumplido sus requerimientos y han demostrado su buen funcionamiento. Los detectores, sin embargo, presentan fallos insalvables que hacen necesaria su sustitución. Lamentablemente los detectores instalados en PANIC sufren de una degradación (según se explica con más detalle en el apéndice A de esta memoria) que provoca un incremento desastroso de los píxeles calientes. En concreto tan solo uno de los cuatro detectores que conforman el mosaico es apto para la obtención de datos científicos. Las partes firmantes se comprometen a llegar a un acuerdo, en un plazo inferior a un año, para sustituir los detectores.

Numerosos casos científicos se benefician del gran campo y de la selección de filtros de la cámara infrarroja PANIC, desde astronomía extragaláctica hasta el estudio del Sistema Solar, además de ser muy adecuada para observaciones tipo *survey* (mapeado). Los objetos denominados extensos, en contraposición a las estrellas que son objetos puntuales, son los grandes candidatos a observaciones con PANIC: galaxias cercanas, nebulosas planetarias, restos de explosiones supernova o regiones de formación estelar.

Muchos de ellos se pueden cubrir con un solo apuntado. Los más grandes requieren varios apuntados con los que crear el mosaico de imágenes que muestra el objeto completo.

El gran campo también favorece la observación de cúmulos o asociaciones de estrellas, ya que se accede a una gran muestra de estrellas con una única observación.

Al disponer de cinco filtros anchos que cubren todo el intervalo del infrarrojo cercano y de algunos de los filtros estrechos más comunes, PANIC puede contribuir de forma muy útil al estudio de las contrapartidas infrarrojas de las explosiones de rayos Gamma (GRB, por sus siglas en inglés, *Gamma Ray Burst*) y a la búsqueda de cuásares con alto corrimiento al rojo.

En su modo de fotometría rápida PANIC permite obtener imágenes de (7×7) arcsec a un ritmo de una imagen cada 1.2 milisegundos, muy adecuado para observar estrellas que son ocultadas por la Luna. La ocultación nos permite detectar la presencia de estrellas compañeras, de materia alrededor de la estrella a medir y determinar el diámetro de estrellas suficientemente grandes.

Desde que finalizó la puesta a punto de la cámara se han llevado a cabo varios proyectos científicos y ya se han publicado algunos de los resultados: variaciones de brillo de V404 Cyg, que alberga un agujero negro (Shaw, Knigge, Meisenheimer, & Ibanez, 2015) y el abrillantamiento de S255IR NIRS 3, un objeto joven de unas 20 masas solares (Caratti, et al., 2017).

A lo largo de esta memoria de Tesis Doctoral se desarrollan la especificación, el diseño, la construcción y verificación en laboratorio y en telescopio de dicha cámara infrarroja de gran campo, desde sus fases iniciales de definición de requerimientos, diseño de la cámara, hasta la integración del nuevo instrumento en el telescopio y su cualificación, pasando por la definición, adquisición y verificación de todos sus componentes.

Se describe a continuación la estructura de la presente memoria:

En el capítulo 2 se presentan los objetivos a cumplir en el desarrollo de este trabajo de Tesis Doctoral.

El capítulo 3 se dedica a la recopilación de los requerimientos y especificaciones del instrumento, en particular, todas las que afectan al diseño óptico y sus prestaciones. Así mismo se presenta una revisión de la teoría óptica y definiciones de los parámetros esenciales que se utilizarán y discutirán en el diseño óptico.

En el capítulo 4 se expone el diseño óptico desarrollado en todas sus etapas, desde el diseño preliminar y su evolución hasta un diseño listo para su construcción. Para seguidamente en el capítulo 5 describir el proceso de la adquisición y verificación de los distintos componentes, su montaje, hasta llegar a las pruebas de laboratorio y la verificación final del instrumento fabricado en telescopio.

En el capítulo 6 se presentan, se discuten y analizan los resultados obtenidos en base a los objetivos del trabajo y, de cuya discusión y análisis se extraen las conclusiones que se exponen en el capítulo 7.

Debido a su extensión, los modelos ópticos del instrumento (apéndice C) y de la herramienta de verificación, el simulador de estrella (apéndice D) se muestran detalladamente en dichos apéndices y no dentro de los correspondientes capítulos 4 y 5. Asimismo se encuentra en los anexos información relevante con respecto a los telescopios

(apéndice B), al mosaico de detectores infrarrojos (apéndice A) y de los principales equipos de laboratorio (apéndice E) usados.

Por último, también en un apéndice (F) se encuentra registrada la línea de trabajo del desarrollo de este proyecto y su temporalización.

2. OBJETIVOS

Este trabajo de tesis engloba las labores llevadas a cabo para la construcción del instrumento PANIC, desde el inicio del proyecto, en julio de 2006, hasta su comisionado en ambos telescopios que terminó en marzo de 2015, en particular en el área de óptica. Las etapas previas concernientes al estudio de viabilidad, y que llevaron a la decisión de la construcción de un diseño refractivo monobrazo, no son objeto de este trabajo de tesis. La doctoranda ha sido responsable del paquete de óptica de esta cámara desde el inicio del proyecto hasta su finalización. Así pues, en esta memoria de tesis abarcamos todas las fases acometidas por la doctoranda para la consecución final del proyecto, que es proveer al Observatorio de Calar Alto de un nuevo instrumento completamente operativo y que cumple los requerimientos exigidos.

Por tanto, a lo largo de esta memoria se cubren los siguientes objetivos:

- Recopilación de requerimientos, tanto científicos como técnicos, y definición de las especificaciones que ha de cumplir la cámara.
- Diseño óptico de la cámara tal que cumpla los requerimientos científicos y las especificaciones.
- Análisis de las calidades del sistema.
- Diseño de sistemas ópticos auxiliares para el alineado en laboratorio y complementos opto-mecánicos para el alineado y verificación del instrumento.
- Definición, especificación, adquisición y verificación de todos los componentes del sistema óptico, lentes, espejos, ventanas y filtros, así como de los sistemas auxiliares necesarios para su alineado y verificación.
- Retroalimentación del sistema óptico para incorporar los distintos elementos ópticos y opto-mecánicos con sus características a sistema construido (*as-built*).
- Montaje, alineado e integración de todos los subsistemas (barriles de lentes, estructura de espejos, filtros y lentes) y del instrumento, incluyendo los detectores de ciencia.
- Realización de las pruebas de aceptación del instrumento respecto a la calidad de imagen, en laboratorio antes y después del transporte y antes de su instalación en el telescopio.
- Análisis y optimización de sus prestaciones.
- Integración del instrumento en los telescopios y realización de las pruebas de ajuste en ambos telescopios.
- Cualificación usando objetos de cielo y verificación de sus requerimientos técnicos acorde con el procedimiento de aceptación del instrumento definido en el MoU.

3. REQUERIMIENTOS Y ESPECIFICACIONES

Al comienzo del proyecto es esencial establecer un marco de trabajo y acotar el problema, para así poder iniciar el estudio del mismo. Esta fase es la captura de los requerimientos del sistema y su consecuente desglose, desde la descripción de alto nivel, científica, hasta llegar a nivel funcional y operacional. Esto nos proporcionará el conjunto de requerimientos científicos y técnicos, necesarios para abordar el diseño del instrumento. Esta tarea es llevada a cabo por el equipo de trabajo del instrumento.

Por un lado, el equipo científico acota los requerimientos a los casos de ciencia aplicables, establece las metas del instrumento y tiene en cuenta cuáles son los factores de viabilidad del mismo, hasta traducir toda esta información a requerimientos concretos del instrumento a construir, que son los requerimientos de alto nivel.

Por otro lado, y en colaboración con el equipo técnico, dichos requerimientos se trasladan a cantidades que son parámetros de diseño. Además, también se añaden aquellos requerimientos técnicos que son consecuencia, directa o indirecta, de las decisiones previas. Éstos dan como resultado el conjunto de especificaciones del sistema.

Esta primera fase de recopilación incluye tanto requerimientos de alto nivel, como especificaciones a nivel de sistema, que proporcionan el citado marco de trabajo y conducen al diseño de la solución óptica adecuada.

Durante el proceso del diseño óptico del sistema se realizan diversos análisis del mismo. De ellos se obtienen las especificaciones detalladas a nivel de subsistemas y de componentes que permiten su fabricación. Asimismo se calculan las especificaciones de posicionamiento de los distintos componentes y, que determinan el procedimiento a usar durante el montaje, ajuste y testado del sistema. El desarrollo y escritura de estas especificaciones es importante, para iniciar el diseño óptico y para el futuro seguimiento del desarrollo del instrumento.

En este capítulo se describirán estos requerimientos de alto nivel (sección 3.2) y cómo evolucionan a las distintas especificaciones (sección 3.3 y 3.4) teniendo en cuenta las condiciones de contorno particulares de este instrumento según se detalla en cada sección. Primero, a continuación se presentan las definiciones y ecuaciones básicas de los parámetros ópticos esenciales que se van a usar en esta memoria de tesis. En la sección Bibliografía se pueden encontrar las referencias bibliográficas utilizadas para el diseño óptico del instrumento, de forma más intensa, en las primeras fases del proyecto.

3.1. DEFINICIONES Y ECUACIONES BÁSICAS

Un telescopio reflector *Ritchey-Chrétien* (RC) capta la luz de objetos lejanos y mediante dos espejos, denominados primario y secundario, forma la imagen en el plano focal *Cassegrain* situado detrás del espejo primario, también denominado **foco Ritchey-Chrétien** (Imagen 3-1). Al ser un sistema completamente reflector la posición de dicho plano, y por tanto, la focal del telescopio no dependen de la longitud de onda. El diámetro del espejo primario es la apertura del telescopio y determina el área colectora del sistema óptico. Se denomina **relación focal**, **F#**, al cociente entre la distancia focal del telescopio, f'_{Tel} , y su apertura, D_{M1} .

$$F\# = \frac{f_{Tel}}{D_{M1}} \quad [3.1]$$

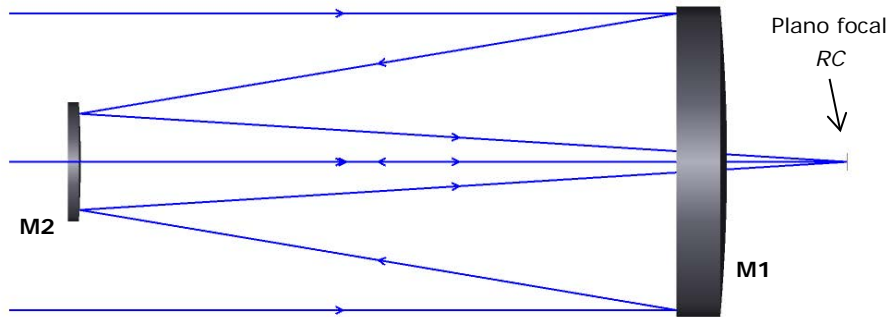


Imagen 3-1: Esquema óptico de un telescopio reflector RC: M1 espejo primario, M2 espejo secundario, ambos hiperbólicos.

Los telescopios T22 y T35 de CAHA son reflectores RC. Su modelización se detalla en el apéndice B. En los diseños realizados en este trabajo de tesis se considera la pupila de entrada del sistema óptico localizada en el espejo primario del telescopio.

El sistema de referencia (Imagen 4-2) está definido de forma que el eje Z es el eje óptico del sistema, positivo en la dirección inicial de propagación de la luz, y los ejes X (sagital) e Y (tangencial) se encuentran contenidos en el plano perpendicular al eje óptico.

El tamaño de la imagen formada en el plano focal del telescopio de objetos en el infinito está relacionado con la distancia focal del telescopio de la siguiente forma.

$$y_{\text{plano focal}} \approx f'_{Tel} \cdot \theta \quad [3.2]$$

donde $y_{\text{plano focal}}$ es el tamaño de la imagen y θ la separación angular en radianes entre dos puntos objeto situados en el infinito.

La **escala de placa**, **EP**, relaciona el tamaño angular del objeto situado en el infinito con el tamaño lineal que tendrán las imágenes que se forman en el plano focal del telescopio. Derivando en la anterior [3.2] se deduce que la escala de placa vendría determinada por:

$$EP \left(\frac{\text{arcsec}}{\text{mm}} \right) = \frac{d\theta}{dy} = \frac{206265}{f'_{Tel}} \quad [3.3]$$

donde la constante **2062065 arcsec** se obtiene al convertir las unidades del ángulo de radianes a arcsec (1 rad = 206265 arcsec).

Esta magnitud también se puede encontrar como **escala de píxel** cuando se expresa con respecto al tamaño del píxel del detector del instrumento acoplado al telescopio.

La región del cielo accesible en el plano focal del telescopio o del detector del instrumento, es el denominado **campo de visión**, **FoV**, y se puede calcular mediante:

$$FoV_{\text{max}} (\text{arcsec}) = EP \left(\frac{\text{arcsec}}{\text{mm}} \right) \cdot y_{\text{max plano focal}} (\text{mm}) \quad [3.4]$$

En **Óptica paraxial** o de **Primer Orden** se estudia el sistema óptico ideal carente de aberraciones. Para la resolución paraxial de sistemas ópticos es muy útil usar la fórmula gaussiana de las lentes delgadas, la cual establece la siguiente relación cuando el índice de refracción objeto e imagen son iguales:

$$-\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{f'} \quad [3.5]$$

donde **a** es la distancia objeto, **a'** la distancia imagen y **f'** la distancia focal imagen de la lente. En primera aproximación da idea del tamaño del sistema a construir y permite la toma de decisiones clave tales como sistemas compuestos y espejos de doblado, como ha ocurrido en el caso de la cámara que nos ocupa.

En sistemas con distancia objeto finita, el **aumento lateral** o **magnificación**, **m**, de un sistema óptico se define como el cociente entre el tamaño de la imagen, **y'**, y el tamaño del objeto, **y**, y además se cumple que se puede obtener como el cociente entre la distancia imagen y la distancia objeto:

$$m = -\frac{y'}{y} = -\frac{a'}{a} \quad [3.6]$$

Para el caso particular de la cámara acoplada al telescopio, esta magnificación lateral de la cámara se puede expresar como cocientes entre las focales de ambos sistemas, de sus relaciones focales, o de sus escalas de placa, según se indica en las siguientes relaciones:

$$m_{\text{cámara}} = \frac{f'_{\text{cámara}}}{f'_{\text{telescopio}}} = \frac{F\#_{\text{cámara}}}{F\#_{\text{telescopio}}} = \frac{EP_{\text{telescopio}}}{EP_{\text{cámara}}} \quad [3.7]$$

Estas relaciones serán utilizadas en el capítulo siguiente (sección 4.1.2) para el planteamiento del sistema óptico.

Otro aumento intrínseco de un sistema óptico es el **aumento axial**, **α**. Si en el eje Z se considera un pequeño segmento objeto, **Δz**, en el espacio imagen le corresponderá otro **Δz'**. La razón entre ambos es el aumento axial, que además se demuestra que es igual al cuadrado del aumento lateral.

$$\alpha = -\frac{\Delta z'}{\Delta z} = m^2 \quad [3.8]$$

Esta relación la utilizaremos en la fase de ajuste del detector del instrumento (5.2.6).

En este punto, sería interesante añadir una matización con respecto a dos elementos esenciales en todo sistema óptico, el diafragma de apertura y el diafragma de campo, y la explicación de las necesidades que imponen un instrumento trabajando en longitudes de onda infrarrojas.

Cualquier objeto a temperatura ambiente emite energía térmica en el infrarrojo. En instrumentos que observan en el infrarrojo, como el caso de PANIC, es esencial reducir la emisión térmica que entra en el instrumento con el fin de minimizar el fondo térmico que recibe el detector del mismo, en particular en la banda fotométrica **K** y así obtener una buena relación señal-ruido.

Por un lado, el instrumento, incluido el detector, ha de ser enfriado a temperaturas criogénicas (≤ 100 K), con el objeto de evitar la emisión térmica del propio instrumento. Dicho enfriamiento ha de ser realizado en condiciones de vacío para evitar la condensación dentro del instrumento. Por tanto, todo el instrumento se encuentra dentro de un criostato al que se le hace vacío ($\sim 10^{-6}$ mbar) y se enfría con nitrógeno líquido (77 K). Éste, como veremos en la siguiente sección (3.2), va a ser el caso de PANIC.

Por otro lado, también en sistemas trabajando en longitudes de onda infrarrojas, para bloquear los objetos calientes procedentes de fuera del instrumento y no provenientes del camino óptico principal, es fundamental introducir en el instrumento dos aperturas.

La primera es el denominado **diafragma de apertura frío**, se denomina “frío” porque se encuentra dentro del tren óptico del instrumento, y por tanto, dentro del criostato. Este diafragma de apertura está localizado dentro del tren óptico tal que su imagen en el espacio objeto es la pupila de entrada del sistema. En el caso de PANIC, como veremos en breve, la pupila de entrada del sistema óptico se encuentra en el espejo primario del telescopio, así se consigue una supresión de los objetos calientes circundantes con una mínima pérdida de flujo en el sistema óptico.

La segunda apertura es **diafragma de campo** que limita la apertura angular del haz óptico al campo de visión deseado para el instrumento. Éste, si se encuentra dentro del criostato del instrumento, es decir es **frío**, es un excelente escudo para todo rayo “caliente” proveniente de fuera del campo de visión. En el caso de PANIC, se diseñó para que fuese frío.

De este modo, el detector de PANIC solo “ve” la radiación procedente del espacio objeto y no los objetos circundantes.

Al trabajar el instrumento en condiciones criogénicas, será necesario calcular los parámetros físicos de los materiales en dos temperaturas, la de trabajo y la de fabricación. Se introduce, pues, la definición del coeficiente de dilatación lineal, α_L , que da cuenta del aumento de longitud de un material cuando éste sufre un aumento de temperatura, y se define como:

$$\alpha_L(T) = \frac{1}{L} \left(\frac{dL}{dT} \right)_p \quad [3.9]$$

A presión constante, si integramos la anterior expresión entre dos temperaturas, inicial y final, se obtiene la siguiente expresión:

$$\int_{T_i}^{T_f} \alpha_L(T) dT = \frac{L_f - L_i}{L_i} \quad [3.10]$$

donde L_i es la longitud física a la temperatura inicial T_i y L_f la longitud a la temperatura final T_f . Despejando, la longitud final viene dada por:

$$L_f = L_i \left(1 + \int_{T_i}^{T_f} \alpha_L(T) dT \right) = L_i (1 + \text{CTE}_{\text{int}}) \quad [3.11]$$

donde CTE_{int} es el coeficiente de dilatación lineal integrado entre las dos temperaturas.

CTE proviene de las siglas en inglés *Coefficient of Thermal Expansion*.

Dadas dos temperaturas concretas, se puede definir un coeficiente de dilatación equivalente que sería igual al CTE_{int} dividido entre el intervalo de temperatura.

$$\text{CTE}_{\text{eq}} \equiv \frac{\text{CTE}_{\text{int}}}{\Delta T} \quad [3.12]$$

De esta forma la longitud final se podría calcular de forma equivalente a la ecuación [3.11] con la siguiente expresión:

$$L_f = L_i(1 + \text{CTE}_{\text{eq}} \cdot \Delta T) \quad [3.13]$$

Volviendo a características ópticas, en todo sistema óptico la imagen de un punto no es un punto, pues debido a los efectos de la difracción, intrínsecos de la naturaleza ondulatoria de la luz, y a las aberraciones ópticas presentes en el sistema, las imágenes de objetos puntuales son una mancha con cierta extensión. Toda desviación del frente de onda formado por el sistema óptico con respecto al sistema ideal que formaría un frente de onda perfectamente esférico, se considera aberración óptica y resultan en una degradación de la calidad de imagen. Esa diferencia entre el frente de onda esférico ideal y el realmente formado por el sistema se conoce como **error de frente de onda (WFE**, del inglés *Wavefront Error*).

La **Óptica de Tercer Orden** incluye los efectos de las aberraciones en el comportamiento de los sistemas y permite evaluar la calidad de los mismos. Las aberraciones ópticas presentes en un sistema dependen, por un lado, de la geometría de los dioptros y de su índice de refracción, son las aberraciones de Seidel o monocromáticas. Y por otro lado, de los efectos dispersivos de los materiales ópticos, son las aberraciones cromáticas.

Hay cinco aberraciones primarias dentro de la Óptica de Tercer Orden, que son: aberración esférica, coma, astigmatismo, curvatura de campo y distorsión. Las tres primeras deterioran la imagen haciéndola borrosa y las dos últimas deforman la imagen. Las cuatro últimas son aberraciones extraxiales, mientras que la aberración esférica afecta a puntos incluso en el eje óptico.

Para determinar el efecto de las aberraciones en la calidad óptica de un sistema y hacer un primer análisis para mitigarlas es comúnmente usado el denominado **criterio de Rayleigh**, que establece que un sistema óptico no está sensiblemente degradado siempre que su WFE, medido entre su valor máximo y mínimo (P-V, del inglés *peak-to-valley*), no exceda un cuarto de la longitud de onda de trabajo.

$$\text{P-V WFE} \leq \frac{\lambda}{4} \quad [3.14]$$

En términos de rms (*root mean square*) dicho criterio es equivalente a:

$$\text{rms WFE} \leq 0.07 \cdot \lambda \quad [3.15]$$

Incluso en la ausencia de aberraciones, el límite de resolución óptica de un sistema debido a la difracción viene determinado por el tamaño del denominado **disco de Airy**, que corresponde al anillo brillante central del patrón de difracción producido por todo sistema óptico con apertura finita. El diámetro de este disco depende de la relación focal del sistema así como de la banda espectral en la que opera y puede ser obtenido como:

$$\text{FWHM}_{\text{PSF Airy}} \cong D_{\text{Airy}} = 1.028 \cdot \lambda \cdot F\# \quad [3.16]$$

donde λ es la longitud de onda expresada en μm , y el diámetro del disco de *Airy* viene dado en las mismas unidades.

En instrumentación astronómica el tamaño de dicha mancha imagen producida por el sistema óptico da cuenta de la **calidad óptica** del mismo y se puede medir con varias métricas. Es importante aclarar cómo se puede realizar una traslación entre las mismas para poder compararlas cuantitativamente.

La imagen instrumental producida, conteniendo tanto los efectos de difracción como las aberraciones, es una distribución de energía en el detector que se conoce como función de dispersión de punto (PSF, en inglés *Point Spread Function*) la cual se puede modelar muy eficientemente por una función Gaussiana bidimensional. El parámetro sigma de la Gaussiana, σ , se puede expresar en términos de otros dos muy usados en astronomía para medir tamaños de las imágenes. En programas de reducción de datos astronómicos se suele usar la anchura a mitad de altura del máximo de la gaussiana, **FWHM** (del inglés *Full Width at Half Maximum*) como medida del tamaño de una estrella. En cambio los requerimientos científicos de calidad de imagen suelen expresarse como el diámetro D_{EE80} , que mide el círculo que encierra el 80% de la energía de la imagen (**EE**, del inglés *Encircled Energy*).

Se puede demostrar las siguientes equivalencias entre estos tres parámetros:

$$\text{FWHM} \cong 2.3548 \sigma \quad [3.17]$$

$$D_{EE80} \cong 3.5882 \sigma \quad [3.18]$$

Además, los programas de diseño óptico suelen usar como métrica el tamaño geométrico de la imagen definido por el **radio rms**.

Para comparar este **radio rms** con la D_{EE80} , se puede también trasladar el primero a su relación con el parámetro σ de una Gaussiana bidimensional. Considerando una distribución gaussiana de N puntos, cuya varianza es σ^2 , es fácil demostrar que dicho radio rms es igual al parámetro σ .

$$\text{radio rms} = \sigma \quad [3.19]$$

Así, haciendo uso de las relaciones [3.17], [3.18] y [3.19], tanto el **FWHM**, como la D_{EE80} , como el **radio rms** se pueden expresar en función de una misma métrica, el parámetro σ de una Gaussiana.

$$\text{radio rms} = \sigma = \frac{\text{FWHM}}{2.3548} = \frac{D_{EE80}}{3.5882} \quad [3.20]$$

Las turbulencias atmosféricas causan un efecto distorsionador en el frente de onda de los objetos astronómicos. Este efecto se denomina **visibilidad astronómica** (*seeing* en inglés) y depende fuertemente de la longitud de onda, siendo mayor a longitudes de onda cortas. Esta condición atmosférica es independiente tanto del telescopio como del instrumento que se usen para la observación astronómica. Para cuantificarlo se toman exposiciones largas (del orden de segundos) tal que se registre en la imagen el movimiento debido a las turbulencias, denominándose dicha imagen **disco de seeing** y se suele medir como el FWHM de la intensidad óptica del disco de *seeing*, expresado en segundos de arco, usualmente en la banda fotométrica **V** (centrada en $0.55 \mu\text{m}$). Esta medida da cuenta de la mejor resolución posible que se puede observar con un telescopio terrestre (con la atmósfera entre el objeto y el telescopio) en una exposición larga. La

cúpula en donde se encuentre el telescopio también suele tener su propio *seeing* asociado y por tanto contribuye a la disminución de la resolución alcanzable.

El *seeing* varía constantemente, y dada una determinada localización, puede incluso variar en escala de minutos. La dependencia con la longitud de onda viene dada por la siguiente relación:

$$\text{FWHM}_{\text{seeing}} \propto \lambda^{-1/5} \quad [3.21]$$

De este modo, conocido el *seeing* a una determinada longitud de onda se puede extrapolar el valor a otra banda a partir de la anterior relación:

$$\text{FWHM}_{\text{seeing-2}} \propto \text{FWHM}_{\text{seeing-1}} \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)^{1/5} \quad [3.22]$$

En último lugar, unas aclaraciones y definiciones concernientes a los filtros astronómicos. En Astronomía se utilizan filtros ópticos de tipo banda de paso para seleccionar las longitudes de onda de interés según el caso científico. Los parámetros principales que definen el filtro son su **longitud de onda central** (λ_c) y la **anchura del paso de banda**, $\Delta\lambda$, calculada a la altura mitad del máximo de transmitancia (**FWHM**). Las longitudes de onda del paso banda para las que se obtiene una transmitancia del 50% se denominan $\lambda_{\text{cut-on}}$, para la más corta, y $\lambda_{\text{cut-off}}$, para la más larga.

$$\text{FWHM} = \Delta\lambda = \lambda_{\text{cut-off}} - \lambda_{\text{cut-on}} \quad [3.23]$$

De modo que la longitud de onda central se obtiene como:

$$\lambda_c = \lambda_{\text{cut-on}} + \frac{\Delta\lambda}{2} = \lambda_{\text{cut-off}} - \frac{\Delta\lambda}{2} \quad [3.24]$$

Cuando la anchura del filtro se expresa en tanto por ciento, se divide dicho FWHM entre su longitud de onda central:

$$\Delta\lambda (\%) = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_c} * 100 \quad [3.25]$$

Se considera que un filtro es ancho, cuando su anchura, expresada como la ecuación [3.25], es mayor al 3%, y estrecho cuando es menor de ese valor.

Las bandas espectrales se definen dentro de un sistema fotométrico en el que los parámetros que definen al filtro están normalizados. En el infrarrojo cercano las bandas infrarrojas están definidas acorde con las ventanas de transmitancia de la atmósfera terrestre, y se designan por las siguientes letras: **Z**, **Y**, **J**, **H** y **K**, en el rango entre 0.8 y 2.5 μm . En la Imagen 6-1 correspondiente a los filtros de PANIC, se muestra la curva teórica de transmisión de la atmósfera de CAHA así como dónde están localizadas dichas bandas espectrales.

Los filtros astronómicos que cubren estas bandas espectrales son filtros anchos, ya que cada filtro cubre completamente el ancho espectral de una ventana atmosférica. Los filtros han de ser interferenciales, para conseguir expresamente que estén centrados en las ventanas atmosféricas y tengan un ancho espectral concreto.

Los filtros interferenciales situados en haz no colimado, debido al cambio de ángulo de incidencia de la luz sobre el filtro, experimentan un ensanchamiento en su ancho de banda

(FWHM), una disminución del valor de su transmitancia y un desplazamiento de su paso de banda hacia longitudes de onda menores. Por otro lado también sus características van a depender de la temperatura a la que se encuentren, sufriendo un desplazamiento de su paso de banda en el mismo sentido que la temperatura. Así, al pasar de temperatura ambiente a criogenia, el filtro se desplazará hacia longitudes de onda más cortas.

Estos efectos dependen no solo de la magnitud de dicho ángulo de incidencia, y la temperatura, sino también de los materiales de que está construido. Dependiendo de la magnitud de dicho ángulo y de las características térmicas dadas por el fabricante, se puede evaluar cuál es el efecto, que será más severo en el caso de filtros estrechos.

3.2. REQUERIMIENTOS DE ALTO NIVEL

De acuerdo, pues con la decisión del Comité Científico Asesor de CAHA, el primer nuevo instrumento para CAHA debería ser una cámara infrarroja de gran campo para el T22. Concebida para propósito general, su principal modo de operación ha de ser imagen en todo el campo de visión. Dicha cámara debe ser acoplada en el foco RC del telescopio y aprovechar el máximo campo de visión accesible en esta estación focal usando un detector de (4096×4096) píxeles. Con esta descripción general de la cámara se comienza el proceso de recopilación de los requerimientos de alto nivel del instrumento, los cuales se enumeran a continuación:

- Etapa de colimación: Al no requerirse ningún tipo de modo de operación espectroscópico, **no** es necesario disponer de una **etapa colimada** dentro de la cámara para incorporar elementos dispersivos.

- Rango espectral: El rango espectral requerido ha de cubrir las bandas fotométricas **Y, J, H y K**, con los correspondientes filtros de banda de paso anchas.

- Escala de píxel: El equipo científico establece que la escala de píxel óptima requerida es de **0.45 arcsec/px**.

La justificación fue que, por un lado, ésta proporciona un muestreo adecuado al *seeing* en CAHA en las bandas infrarrojas. Pues, de acuerdo con los datos disponibles en 2005 (Datos *seeing* Observatorio Calar Alto, 2001-2005) y publicados en (Sánchez S., Aceituno, Thiele, Pérez-Ramírez, & Alves, 2007), la mediana del *seeing* en la banda **V** (0.55 μm) es de ~ 0.9 arcsec en CAHA. Extrapolando mediante la ecuación [3.22] a la banda **J** (1.25 μm) y **K** (2.1 μm), la mediana es de ~ 0.8 arcsec y ~ 0.7 arcsec, respectivamente.

Y, por otro lado proporciona un campo de visión que abarca casi todo el campo disponible en el foco RC del telescopio.

- Detector: Dada la experiencia del MPIA en detectores infrarrojos y de acuerdo con el estudio de viabilidad, el detector infrarrojo elegido sería un mosaico de cuatro detectores HAWAII-2RG con *cut-off* en 2.5 μm , cada uno de 2048×2048 píxeles, y con el mínimo posible de hueco físico entre detectores. La temperatura de operación óptima de estos detectores se encuentra en el rango entre 77 y 80 K. En el apéndice A se dan los detalles técnicos de estos detectores finalmente fabricados e implementados en PANIC.

- Campo de visión: La decisión sobre la escala de píxel, junto con la del detector, conlleva a la obtención de un tamaño total de visión de alrededor de (32×32) arcmin,

como se deduce en la ecuación [4.5] del siguiente capítulo. Dicho tamaño de campo es prácticamente el máximo campo de visión sin viñeteo al que se puede acceder en el foco RC del T22.

- Instrumento criogénico: Para minimizar el fondo térmico que recibe el detector del instrumento, en particular en la banda **K**, no solo el detector, sino también el instrumento completo, necesitan ser enfriados a temperaturas criogénicas por debajo de los 100 K y además estar aislados térmicamente de los objetos calientes, y por tanto de su radiación térmica, de fuera del instrumento. Esto requiere que el instrumento esté contenido en un criostato al vacío, el cual es enfriado con nitrógeno líquido.

- Diafragma de apertura frío: Para obtener la máxima capacidad colectora de luz el espejo primario del telescopio es la pupila de entrada del sistema. De modo que, para bloquear adecuadamente el instrumento y que al detector llegue solamente la radiación procedente del cielo, pero no cualquier otro objeto caliente, es necesario que el sistema óptico rehaga imagen de la pupila dentro del tren óptico para que se encuentre en frío y que esta localización sea accesible para instalar el correspondiente diafragma de apertura.

- Diafragma de campo frío: Para bloquear los objetos no procedentes del campo de visión, contribuyendo así a la minimización del fondo térmico, es deseable dotar al sistema de un diafragma de campo localizado dentro del criostato del instrumento.

- Mecanismo de enfoque: Para finalizar con el listado inicial de requerimientos de alto nivel, por sencillez en el desarrollo del instrumento, el número de mecanismos criogénicos ha de ser el mínimo posible. Se decide no instalar mecanismos internos en el instrumento salvo los necesarios para el movimiento de las ruedas de filtros. Por tanto el sistema de reenfoque del instrumento necesario por la dependencia con la longitud de onda de operación de la posición de foco, ha de realizarse con el mecanismo de enfoque del telescopio, el ajuste de la posición del espejo secundario.

Durante el diseño óptico inicial de PANIC, el equipo científico propuso algunas funcionalidades que iban más allá de estos requerimientos básicos mencionados y de las que se beneficiarían los casos científicos. Éstas son:

- Extensión del rango espectral: Extender el rango espectral tal que incluya también la banda fotométrica **Z**, de 0.8 a 0.95 micras. No requiere calidad óptica en este rango, pero sí que la cámara sea capaz de tener transmisión en dicha banda. De este modo el instrumento abarcará desde las 0.82 micras hasta las 2.45 micras de rango espectral.

- Filtros astronómicos estrechos: El uso de filtros de paso de banda estrechos de hasta un 1% de su longitud de onda central. Este requerimiento impone que el máximo ángulo de incidencia sobre el filtro no exceda de cierto valor, como veremos con más detalle en el siguiente capítulo en el apartado del diseño final (4.3).

- Escala de pixel adicional: Una segunda escala de placa de 0.25 arcsec/px, que permita una mayor resolución espacial en la banda **K** cuando haya condiciones de muy buen *seeing*.

- Sistema óptico refractivo: La decisión adoptada por el Comité Científico Asesor de CAHA fue la opción de la construcción de un diseño refractivo monobrazo, pudiendo usar espejos planos tan solo para el empaquetado del sistema.

En la Tabla 3–1 se enumeran estos requerimientos básicos iniciales que establecen el marco de trabajo de partida.

Parámetro	Requerimiento
Telescopio	T22
Estación focal	Foco RC
Modo de operación	Imagen, en todo el campo de visión
Rango espectral	(0.8 – 2.42) μm 0.95– 2.42 μm con calidad de imagen 0.82-0.95 μm con transmisión óptica
Filtros	Filtros anchos: Z, Y, J, H y K_s Filtros estrechos: ~ 1%
Detector infrarrojo	Mosaico de (4096x4096) píxeles, Pixel 18 μm HAWAII-2RG con <i>cut-off</i> en 2.5 μm
Espacio entre detectores	Mínimo
Escala de píxel/placa	0.45 arcsec/px
FoV	(32x32) arcmin, para 0.45 arcsec/px
Pupila de entrada	Espejo primario del telescopio
Imagen de la pupila de entrada	Disponible para introducir un diafragma de apertura en frío dentro del tren óptico
Fondo térmico	A minimizar, en especial en la banda K
Condiciones de operación	Temperatura: ~ 80 K (nitrógeno líquido) Presión: 10^{-6} mbar
Mecanismo de enfoque	Espejo secundario del telescopio
Segunda escala de placa	0.25 arcsec/px
Tipo de sistema óptico	Refractivo

Tabla 3–1: Requerimientos básicos iniciales.

3.3. ESPECIFICACIONES DEL SISTEMA

Las especificaciones del sistema óptico cubren un amplio rango de necesidades. Por un lado, se usan para describir las características que el instrumento debe tener para cumplir las necesidades del usuario; y por otro, son esenciales para la operación del instrumento de forma satisfactoria.

En el caso de PANIC, las especificaciones funcionales de la calidad de imagen y otras características ópticas, tales como la escala de placa y la distorsión óptica, son esenciales ya que:

- sirven de meta para el diseño y construcción del instrumento,
- son la base para el cálculo de las tolerancias de los componentes del sistema óptico,
- dirigen la especificación detallada de los componentes, la cual se usa para la adquisición y fabricación de los componentes ópticos y opto-mecánicos del sistema completo,
- son la base de las especificaciones de montaje,
- determinan el procedimiento a usar durante el montaje, ajuste y testado del sistema.

Así, todo el conjunto de especificaciones del sistema incluye requerimientos desde alto nivel, tales como telescopio, modo de operación, escala de placa, rango espectral, campo de visión, etc.; como especificaciones funcionales, como calidad de imagen, distorsión, transmitancia, y especificaciones operacionales, peso, tamaño, criogenia, flexiones; y hasta especificaciones detalladas a nivel de componente, como calidad de superficie, materiales usados, radios de curvatura, recubrimientos, hasta todos los parámetros que permitan la fabricación de dichos componentes.

Los requerimientos iniciales de alto nivel tienen consecuencias directas en el diseño de PANIC, y por tanto, se comienza el desglose de especificaciones del sistema del siguiente modo:

- Más especificaciones ópticas: Acorde con los casos científicos del instrumento, el equipo científico establece las especificaciones ópticas, tales como la calidad óptica, la tolerancia en el desplazamiento de los filtros estrechos (al no tener haz colimado), la distorsión óptica, la transmisión espectral del sistema y el tamaño y la intensidad relativa de los fantasmas ópticos.

- Ligaduras al trabajar en el foco RC del T22: La estación focal RC del telescopio T22 impone las siguientes ligaduras al sistema:

- la cámara PANIC ha de ser instrumento acoplado a dicho foco durante operación,
- el peso del instrumento completo ha de ser menor de 400 Kg,
- la longitud del instrumento no puede exceder el espacio entre el RC foco y la horquilla de la montura del telescopio,
- las flexiones del instrumento no pueden degradar su calidad óptica.

En esta Imagen 3-2 se presenta una simulación mecánica realizada por el equipo de mecánica del instrumento en la que se puede visualizar cómo quedaría acoplada la cámara al foco RC del telescopio. También se presenta en la misma imagen dos fotos de la situación real tras el primer montaje de PANIC en el T22 para su comisionado en dicho telescopio.

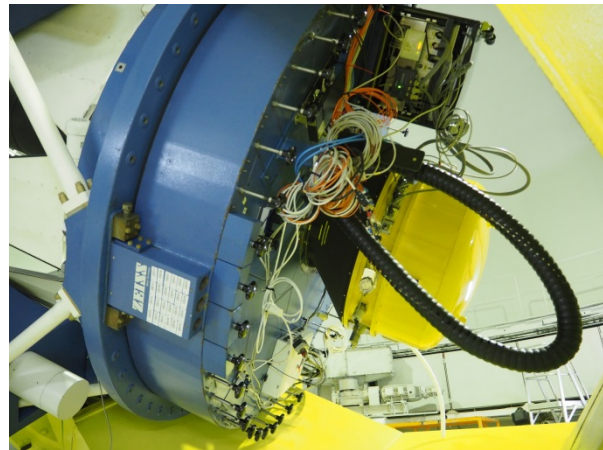
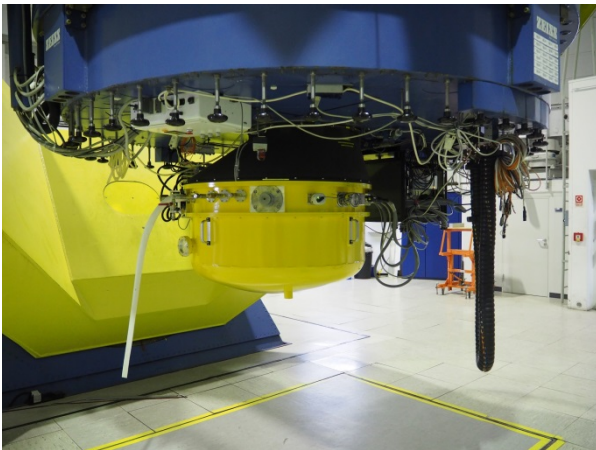
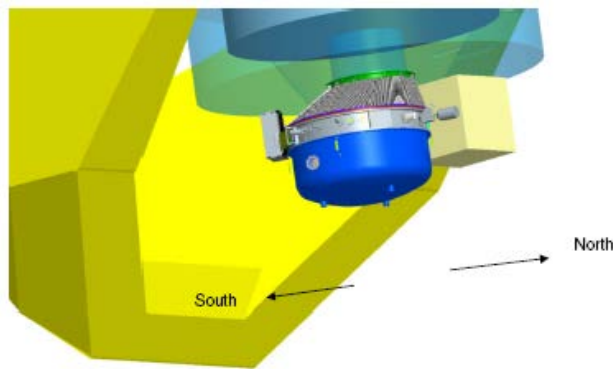


Imagen 3-2: Arriba: Simulación mecánica de PANIC acoplada al T22. Debajo: PANIC acoplada al T22 durante su primer instalación.

- Implicaciones de la segunda escala de píxel: Las implicaciones del requerimiento de alto nivel de una segunda escala de placa de 0.25 arcsec/px son más complejas como se verá en el capítulo 4, en las secciones correspondientes al diseño preliminar (sección 4.2) y al diseño final del instrumento (sección 4.3). La consecución de este requerimiento conllevará en la fase de diseño preliminar a un diseño de dos escalas de placa dentro del mismo instrumento. Sin embargo, la implementación final adoptada, así aprobada en FDR, será que PANIC también pueda operar en el T35 para obtener dicha escala de placa.

En la Tabla 3–2 se enumeran estas especificaciones básicas iniciales que se van añadiendo al conjunto de requerimientos del instrumento.

Parámetro	Requerimiento
Calidad de imagen, para la escala de píxel de 0.45 arcsec/px	$D_{EE80} \leq 0.9 \text{ arcsec} = 2 \text{ px}$ en todo el FoV y en todo el rango espectral
Calidad de imagen, para la escala de píxel de 0.25 arcsec/px	$D_{EE80} \leq 0.75 \text{ arcsec} = 3 \text{ px}$ en todo el FoV y en todo el rango espectral
Distorsión	$\leq 1.5 \%$
Fantasma: intensidad relativa tamaño en el detector	$< 10^{-4}$ $> 10 \text{ arcsec}$
Filtros estrechos: desplazamiento permitido en su λ_c	$\leq 0.3 \%$
Transmisión óptica	Maximizar en todo el rango espectral
Peso	$\leq 400 \text{ kg}$
Longitud desde el plano focal	$\leq 110 \text{ cm}$

Tabla 3–2: Especificaciones básicas iniciales.

3.4. OTROS REQUERIMIENTOS

Además de los anteriores, son importantes otras consecuencias que se producen en el diseño debido a los requerimientos de alto nivel, según se explica a continuación:

- Reimaginador de pupila: La necesidad de introducir un diafragma de apertura en el camino óptico implica la necesidad de tener una herramienta de verificación para su alineado durante la operación del instrumento. Dicha herramienta es un reimaginador de pupila que haga imagen de dicho diafragma de apertura en el espacio imagen del instrumento, en el caso de PANIC, en el propio detector.

- Maximización de la relación señal-ruido en la banda K:

a) El fondo térmico ha de ser minimizado en especial en la banda K, por lo que es requerido que tanto el diafragma de apertura, como el reimaginador de pupila estén optimizados para las longitudes de onda de la banda **K**.

b) También relacionado con la disminución del fondo térmico, se requiere la implementación de un diafragma de campo frío localizado dentro del tren óptico y en particular en la posición del plano focal del telescopio.

En la Tabla 3–3 se listan de nuevo estos requerimientos para su posterior recopilación.

Parámetro	Requerimiento
Verificación alineado del diafragma de apertura frío	Implementar un reimaginador de pupila Optimizado para la banda K, en tamaño y posición
Diafragma de apertura frío	Optimizado para la banda K
Diafragma de campo frío	Implementar un diafragma de campo interno y frío

Tabla 3–3: Otros requerimientos iniciales.

3.5. ESPECIFICACIONES DETALLADAS

Las especificaciones detalladas del sistema óptico y de todos y cada uno de sus componentes van a ir produciéndose durante el proceso del diseño óptico. Éstas se encuentran ya en el nivel del control del ingeniero a cargo del sistema, en este caso, la doctoranda. No vamos a hacer aquí un listado exhaustivo de las mismas, aunque sí se van a ir mencionando a lo largo de esta memoria de tesis, en el próximo capítulo (4), al ir pasando por las distintas fases del proyecto.

El conjunto de ellas es complejo. En primer lugar, los análisis que han de ser realizados en el sistema para la completitud de los requerimientos, nos impondrán especificaciones detalladas, tanto a los elementos ópticos como a elementos de otras áreas. Así, el estudio de los materiales ópticos a utilizar en el diseño y el cálculo de sus correspondientes índices de refracción y de sus CTEs a la temperatura de trabajo, imponen por un lado, restricciones a qué materiales utilizar, y por otro, especificaciones detalladas a otras áreas, como son al área mecánica y de criogenia. Los análisis de tolerancias y el presupuesto de errores óptico también proporcionarán más especificaciones detalladas tanto a los componentes ópticos para su fabricación (calidad de

superficie, materiales usados, radios de curvatura, grosores, etc.) como a la opto-mecánica. Igual ocurre con los análisis de fantasmas y luz difusa.

En segundo lugar, también se imponen ligaduras debido a las diferentes interfaces con otros subsistemas y las condiciones de operación del instrumento. Por ejemplo, la opto-mecánica que sujeta los elementos ópticos, el montaje de los mismos en barriletes y luego en el banco óptico, añaden más especificaciones a los componentes ópticos (como veremos más adelante los chaflanes de las lentes que tienen gran impacto en el diseño).

Y, en tercer lugar engloba las especificaciones derivadas de la iteración con los fabricantes que permiten su fabricación y que se reflejarán en sus correspondientes planos de fabricación y en el contrato formalizado con las compañías correspondientes.

Con respecto a las monturas de las lentes, se adopta una solución opto-mecánica que no es convencional y que tienen gran impacto en el diseño del sistema óptico. El diseño de la montura propuesta por el MPIA y finalmente adoptado, proviene de su experiencia anterior y de su exitosa implementación en otros instrumentos como son ALFA (Costa, et al., 2004) y (Bizenberger, Baumeister, Costa, & Peter, 2005)) y Omega2000 (Baumeister, et al., 2002). Éste último contiene lentes de similares dimensiones a PANIC. Las monturas deben permitir la supervivencia de las lentes a ciclados criogénicos por un lado, y por otro, lograr posicionar la lente a las tolerancias requeridas por el diseño óptico. Es decir, que una vez posicionada la lente a temperatura ambiente en su montura, ésta debe hacer que la lente esté centrada a la temperatura de trabajo de PANIC, y conservar dicha posición a lo largo de los ciclados criogénicos. En (Baumeister, et al., 2002) se describe en detalle el diseño de la montura propuesta, cuyo esquema se presenta en la Imagen 3-3.

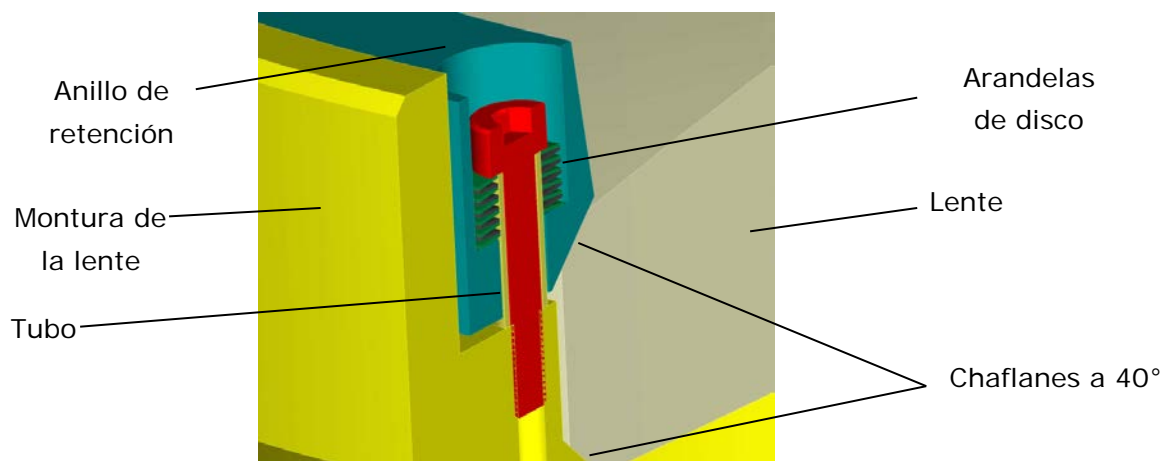


Imagen 3-3: Montura de las lentes propuesta para PANIC.

Esencialmente impone a las lentes el tener unos chaflanes a 40° con una longitud mínima de 4 mm y una terminación de pulido óptico para permitir que la lente se deslice sobre la superficie cónica de la montura sin apenas fricción. Esto implica una disminución del espesor en el borde de la lente de 5.15 mm (debido a los chaflanes a ambos lados de la lente, $2 \times 4 \text{ mm} \times \text{sen } 40^\circ$). Además para el ajuste de centrado de las lentes en su propia montura es necesario que la parte cilíndrica del borde tenga un grosor mínimo. Hasta la fase de FDR de la Óptica, dicho espesor mínimo fue de 1.5 mm, dando un grosor total

mínimo de 6.5 mm. Luego, durante el diseño detallado de FDR de la mecánica y la iteración final con el fabricante de las lentes, es requerido un mínimo de 3 mm, resultando en un grosor total en el borde de 8.5 mm.

Este requerimiento tiene gran impacto en la geometría y posterior fabricación de las lentes pues éstas han de:

- tener un grosor mínimo en el borde de 6.5 mm (hasta FDR de la Óptica) y luego de 8.5 mm (en fabricación real) para permitir la implementación del chaflán requerido por la mecánica y el posterior ajuste de la lente en su montura,
- ser de un material que pueda ser realizado el chaflán sin peligro de rotura de la lente,
- sobredimensionarse en diámetro un mínimo de 6 mm ($2 \times 4 \text{ mm} \times \cos 40^\circ$) para, por un lado, permitir la implementación de los chaflanes sin influir en la apertura óptica y no producir viñeteo y, por otro lado, disminuir la posible luz difusa que podría producirse en los chaflanes de las lentes.

En la siguiente Imagen 3-4, proveniente de (Baumeister, et al., 2002), se esquematiza la secuencia del proceso de enfriado de las distintas partes del conjunto lente-montura desde temperatura ambiente a frío. Debido a la bajada de temperatura se produce un desplazamiento de la lente y el anillo de retención dentro de la montura:

- a) A temperatura ambiente.
- b) Comienza a bajar la temperatura y primero se contrae la montura de aluminio y la lente y el anillo de retención se desplazan hacia arriba.
- c) Sigue bajando la temperatura y la lente se enfría y por tanto se contrae, entonces la lente se desliza en la montura hacia abajo, también el anillo de retención.
- d) Finalmente se enfría el anillo de retención y éste se desplaza hacia arriba hasta su posición en frío.

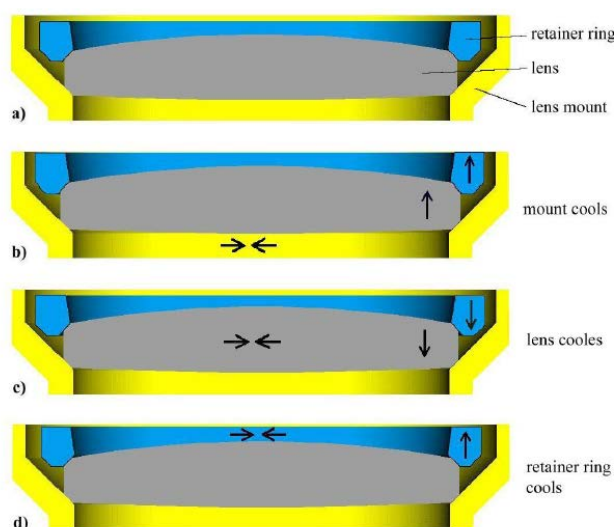


Imagen 3-4: Desplazamiento de la lente y el anillo de retención dentro de la montura debido a la bajada de temperatura.

Con respecto a las condiciones de operación del instrumento, nos encontramos primeramente con esta serie de ligaduras:

- La ventana del criostato ha de tener cierto grosor, dimensión y material.

El material ha de soportar tanto la diferencia de presión entre el exterior (presión atmosférica) y el interior del criostato (del orden de 10^{-6} mbar), como la diferencia de temperatura exterior (temperatura ambiente, en laboratorio de 20 °C, y en telescopio durante operación de hasta 0 °C), y la interior de criogenia.

- Las distancias entre los espejos ha de ser tal que permita el doblado del camino óptico y no produzca viñeteo.

• Las lentes han de tener espacio entre ellas pues al trabajar en criogenia no pueden estar cementadas. Este espacio necesario para la contracción-dilatación ha de asegurarse que exista tanto en el centro como en el borde de las distintas lentes. En la iteración con los ingenieros mecánicos éstos requieren de un espacio mínimo entre lentes de 1 mm en las condiciones de trabajo del sistema óptico.

- La distancia entre la interfaz del detector a la lente que se sitúe delante del mismo tiene que ser mayor de 10 mm, espacio mínimo requerido por el diseño mecánico para el acople de la montura del detector.

4. DESARROLLO Y DISEÑO DE PANIC

Este capítulo y el siguiente contienen todo el desarrollo del trabajo de tesis. Engloba la descripción detallada de las actividades realizadas a través de sus distintas etapas, cómo se ha realizado y con qué herramientas.

Primeramente en este capítulo, se explica el desarrollo y el diseño de PANIC y se presentan los diseños ópticos de la cámara de manera general. En el apéndice C se encuentra el detalle más exhaustivo del diseño, desde la fase final, al diseño en fabricación, y por último, el construido.

Además, para poder seguir el progreso temporal de toda la tesis y en particular de este capítulo, el esquema de la línea de trabajo puede encontrarse en el apéndice F.

4.1. DESARROLLO DEL SISTEMA ÓPTICO

4.1.1. LAS FASES DEL DISEÑO ÓPTICO DE PANIC

El proceso de realización de un sistema óptico abarca desde la captura de requerimientos hasta la integración final del instrumento y las pruebas finales del sistema terminado. Esta andadura se divide en varias etapas con distinto alcance técnico y documental, acorde al estado de desarrollo del proyecto en cada una de ellas. Este trabajo de tesis nos llevará por este proceso, según se explica en el presente capítulo.

Como fruto de un estudio de viabilidad el Comité Científico Asesor de CAHA eligió la opción c), cámara monobrazo, según se ha mencionado anteriormente en el capítulo de Introducción. Esa fase del proyecto es la de diseño conceptual, y no forma parte de esta memoria.

En nuestro caso las fases que abarca el desarrollo de este trabajo de tesis son:

- Fase de Recopilación de requerimientos y definición de especificaciones.
- Fase de Diseño Óptico Preliminar.
- Fase de Diseño Óptico Final.
- Fase de Fabricación y Aceptación de los distintos subsistemas.
- Fase de Alineado, Integración y Pruebas de ingeniería finales en laboratorio.
- Fase de Alineado y Verificación del instrumento en ambos telescopios de CAHA.

4.1.2. EL PLANTEAMIENTO DEL DISEÑO ÓPTICO

El primer paso en el proceso del diseño óptico es la recopilación de todos los parámetros y especificaciones ópticos básicos tal que permita el planteamiento del problema óptico. En nuestro caso, el telescopio y el detector de la cámara son parámetros de diseño ya fijados, y los requerimientos enumerados en el capítulo 3 determinan el resto de parámetros básicos de la cámara.

Esencialmente el diseño óptico de la cámara es un único tren óptico que reimagina el cielo en el detector con una relación focal de $F/3.74$, para una escala de placa de 0.45 arcsec/px.

El detector infrarrojo es un mosaico formado por cuatro detectores HAWAII-2RG (más información en el apéndice A) de 2048 x 2048 píxeles cada uno, con un tamaño de píxel de 18 μm , fabricados por la empresa *Teledyne (Teledyne Scientific & Imaging)*, montados e integrados en una unidad denominada "focal plane array" (FPA) (Imagen A-1). El empaquetado de los detectores en el mosaico es tal que el hueco físico entre ellos es mínimo. En estas condiciones se obtiene un campo de visión de 31.8x31.8 arcmin.

En el Apéndice B se encuentran detallados todos los datos de los telescopios, y en particular, los que aquí se van introduciendo.

La relación focal del T22 se puede calcular a partir de su longitud focal y su apertura (ecuación [3.1]):

$$F\#_{T22} = \frac{f_{T22}}{\varnothing_{\text{apertura}}} = \frac{17611 \text{ mm}}{2200 \text{ mm}} = 8.005 \pm 0.021 \quad [4.1]$$

Por otro lado, su escala de placa se puede determinar mediante la ecuación [3.3]:

$$EP_{T22} \left(\frac{\text{arcsec}}{\text{mm}} \right) = \frac{206265}{17611} = (11.712 \pm 0.020) \text{ arcsec/mm} \quad [4.2]$$

Entonces el máximo campo de visión del telescopio accesible en su plano focal RC (ecuación [3.4]) tiene un diámetro de:

$$FoV_{\text{max-T22}} (\text{arcsec}) = 11.712 \left(\frac{\text{arcsec}}{\text{mm}} \right) \cdot 170 (\text{mm}) = 33.18 \text{ arcmin} \quad [4.3]$$

La escala de píxel requerida para la cámara es de 0.45 arcsec/px, que se traduce a la siguiente escala de placa (en arcsec/mm) conocido el tamaño del píxel:

$$EP_{\text{PANIC}} \left(\frac{\text{arcsec}}{\text{mm}} \right) = 0.45 \left(\frac{\text{arcsec}}{\text{px}} \right) \cdot \left(\frac{1 \text{ px}}{18 \mu\text{m}} \right) = 25 \left(\frac{\text{arcsec}}{\text{mm}} \right) \quad [4.4]$$

El mosaico de detectores (según se ha explicado en la sección 3) ha de tener el mínimo hueco entre los cuatro detectores. Los primeros contactos con el fabricante del detector reportan un hueco mínimo equivalente a 147 píxeles. Resultando en un campo de visión de:

$$FoV_{\text{PANIC}} (\text{arcsec}) = 25 \left(\frac{\text{arcsec}}{\text{mm}} \right) \cdot (4096 + 147)(\text{px}) \cdot \left(\frac{18 \cdot 10^{-3} \text{ mm}}{1 \text{ px}} \right) = 31.82 \text{ arcmin} \quad [4.5]$$

Este campo de visión cumple con el requerimiento de utilizar el máximo campo accesible del telescopio sin viñeteo (ecuación anterior [4.3]).

Por otro lado, ahora se puede calcular la magnificación lateral requerida de la cámara acoplada a este telescopio, mediante la ecuación [3.7]:

$$m_{\text{PANIC}} = \frac{EP_{T22}}{EP_{\text{PANIC}}} = \frac{11.712}{25} = 0.4685 \quad [4.6]$$

Que también se puede obtener como el cociente entre las relaciones focales de la cámara y del telescopio o el cociente de sus longitudes focales:

$$m_{\text{PANIC}} = \frac{F\#_{\text{PANIC}}}{F\#_{\text{Telescopio}}} = \frac{f_{\text{PANIC}}}{f_{T22}} \quad [4.7]$$

Despejando de la anterior se obtiene una relación focal requerida para la cámara de 3.75. De la misma ecuación [4.7] también se puede calcular que la focal efectiva de la cámara ha de ser 8251 mm. Con este paso hemos transformado los requerimientos científicos a parámetros ópticos.

De forma análoga se obtienen los requerimientos para la segunda escala de pixel requerida. En la Tabla 4–1 se exponen estos parámetros básicos calculados.

Parámetro		Configuración óptica de PANIC	
		0.45 arcsec/px	0.25 arcsec/px
Detector infrarrojo	px	4096x4096	
Espacio entre detectores	px	147	
Tamaño del pixel	μm	18	
Escala de placa	arcsec/px	0.45	0.25
	arcsec/mm	25.0	13.9
FoV	px	4096+147	
	mm	76.374	
	arcmin	31.82	17.68
Magnificación lateral	adim	0.4685	0.8433
Focal efectiva	mm	8251	14851
Relación focal	F#	3.750	6.75

Tabla 4–1: Parámetros básicos de diseño de la cámara, conteniendo las dos escalas de pixel para trabajar en el T22.

4.1.3. EL SISTEMA ÓPTICO INICIAL

El segundo paso en el proceso del diseño óptico es establecer una solución viable al problema mediante óptica paraxial en el que se trata de resolver el sistema tan solo con las leyes de la reflexión y refracción, y lentes paraxiales. En nuestro caso, la solución ha de partir de una cámara monobrazo. De la ecuación [3.6], despejando la distancia imagen, $a' = -a \cdot m$, y teniendo en cuenta la distancia focal y magnificación requeridas para la cámara (Tabla 4–1), se pueden obtener los valores paraxiales de la distancia objeto e imagen sustituyendo en la ecuación [3.5], según se muestra en la Tabla 4–2.

La solución paraxial nos revela que el sistema va a ser muy largo, más largo que la máxima longitud disponible para el instrumento en ese foco. Por tanto, se hace necesario el empaquetado del sistema mediante espejos pues la longitud del instrumento no puede exceder el espacio entre el RC foco y la horquilla de la montura del telescopio, según ya vimos en la sección 3.3.

Parámetro		Configuración óptica de PANIC	
		0.45 arcsec/px	0.25 arcsec/px
Distancia objeto	m	-25.86	-32.46
Distancia imagen	m	12.12	27.37

Tabla 4–2: Distancias objeto e imagen para la solución paraxial.

A continuación se analizan las aberraciones de tercer orden, así se estudian las aberraciones del telescopio en su plano focal RC, dado el gran campo que hay que cubrir en el diseño. El plano focal de un telescopio *Ritchey–Chrétien* está libre de aberración esférica y coma, pero posee astigmatismo y una curvatura de campo altos (información más específica sobre el modelo óptico del telescopio se puede encontrar en el apéndice B). En el caso particular del T22, nos encontramos que para un campo de visión mayor a los 13 arcmin el WFE ya no cumple el criterio de *Rayleigh* (ecuación [3.15]), debido al astigmatismo y a la curvatura de campo.

En el diseño de PANIC, por tanto, una **lente de campo**, que se puede situar cercana al plano focal del telescopio nos ayudará a disminuir aberraciones del tipo fuera de eje del sistema (en particular la curvatura de campo) y además con la ventaja añadida de que disminuirá el viñeteo y que nos permite comenzar el sistema óptico antes del foco del telescopio y así poder situar el diafragma de campo en frío (recordemos que éste se sitúa en la posición del foco del telescopio) detrás de dicha lente.

Dado que el campo de visión es muy grande, usaremos de nuevo otra lente de campo, en este caso con la función de **lente aplanadora de campo** (divergente), justo delante de plano focal del instrumento para corregir la curvatura de campo y aplanarlo.

Con respecto a la reimaginación de la pupila, en instrumentos donde se van a introducir elementos dispersivos, normalmente éstos se introducen en la etapa colimada, en la localización de la pupila reimaginada. Dado que PANIC no tiene ningún modo de espectroscopía y no se requiere de una etapa interna colimada, esto permite cierto grado de libertad. En cambio, sí se ha de tener en cuenta dos aspectos.

El primero es el formar una imagen de la pupila de entrada, situada en el espejo primario del telescopio, dentro de la óptica de la cámara para introducir el diafragma de apertura frío. Por este motivo se va a necesitar al menos dos sistemas de lentes o barriles, uno previo a la reimaginación de la pupila y otro posterior.

El segundo aspecto es la necesidad de introducir filtros estrechos en el camino óptico cuya degradación sea menor al 0,3%. Al no disponer de etapa colimada será necesario prever una localización óptima para los filtros con el fin de disminuir los ángulos de incidencia sobre los mismos, para disminuir los efectos en el paso banda del filtro debido al ángulo, según se explicó en la sección 3.1. En este primer análisis la disposición óptima estará localizada entre el segundo barril de lentes y la segunda lente de campo.

El diseño de la cámara ha de ser refractivo (según ya se ha mencionado en el capítulo anterior). Dado el rango espectral a cubrir, para disminuir las aberraciones cromáticas de un sistema refractivo dichos sistemas de lentes han de ser lo más apocromáticos posibles. Es por tanto que cada uno de los dos barriles previstos estará compuesto como mínimo por un triplete de lentes, para disminuir las aberraciones ópticas y cromáticas.

A este respecto se realiza una selección de materiales ópticos para su uso en el infrarrojo tales que maximicen la transmitancia del sistema en el rango espectral requerido, por un lado, y tal que los materiales posean valores conocidos de su índice de refracción y de su CTE hasta la temperatura de trabajo requerida de 80 K. Estas condiciones de trabajo, vacío y criogenia también imponen una separación entre lentes al no poder ir éstas cementadas. Impondremos siempre un espacio mínimo entre elementos ópticos.

En la Imagen 4-1 se esquematiza los elementos ópticos principales identificados en este primer análisis.

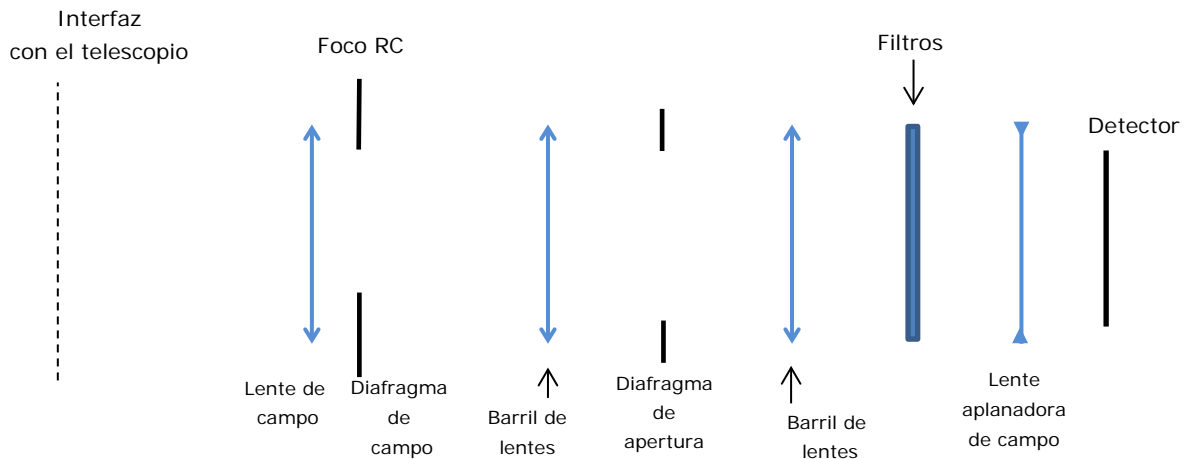


Imagen 4-1: Esquema básico de los elementos ópticos principales necesarios.

En resumen, teniendo en cuenta toda esta información se realizan los primeros cálculos para tener un diseño de primer orden y determinar qué elementos ópticos son necesarios para formar el sistema óptico. Con ese sistema se estiman las aberraciones de tercer orden para ver cuántos elementos ópticos son necesarios para corregir las aberraciones geométricas y cromáticas, para obtener un diseño que las corrija y que será aproximado a la solución deseada. Y este diseño de tercer orden sería nuestro punto de partida para comenzar el siguiente paso.

4.1.4. MODELIZACIÓN DEL SISTEMA ÓPTICO

El tercer paso es la modelización del sistema en un software adecuado tal que nos permita la optimización del diseño y realizar todos los cálculos pertinentes para llevar el sistema a fabricación y garantizar su correcto funcionamiento.

Los diseños ópticos de PANIC y de los sistemas auxiliares (usados durante su alineado y verificación) han sido desarrollados usando un programa comercial de software denominado *Zemax OpticStudio* (en adelante *Zemax*), en la actualidad propiedad de la compañía Zemax LLC.. En él se pueden modelizar, analizar, optimizar y diseñar sistemas ópticos.

Los datos generales que se usan para comenzar a describir el sistema en su totalidad incluyen la localización y dimensión de la pupila de entrada, el campo de visión, los campos de trabajo (sobre el eje, fuera de eje, etc.) y las longitudes de onda.

Esta herramienta informática de diseño óptico es flexible y permite ir introduciendo superficies para ir describiendo cada elemento óptico con sus características (curvatura, espesor, material, distancias, ángulos, recubrimientos, etc.) hasta modelizar el sistema óptico completo. El programa realiza el **trazado de rayos** (*Optical Ray Tracing, ORT*) a través del sistema óptico que le ha sido introducido.

Dicho software incluye diversas herramientas de análisis tanto para la **evaluación** de la calidad y rendimiento del sistema, como para el cálculo de **tolerancias** y determinar así el efecto de errores de fabricación y errores de montaje. También incluye herramientas que permiten la **optimización** del sistema en diseño.

Tanto el rango espectral como el campo de visión pueden ser muestreados en tantos puntos como sea necesario. La modelización del sistema óptico comienza por la definición de las longitudes de onda en las que será analizado, así como los campos para los que será evaluada la imagen que proporcione el sistema óptico. Se ha de especificar una longitud de onda como primaria, que será utilizada por el sistema para calcular todos los parámetros paraxiales, tales como distancia focal, tamaño de las pupilas, etc. Ésta se suele establecer en una longitud de onda intermedia dentro del rango de optimización para que, durante la misma, obtener prestaciones balanceadas para todo el rango espectral. Con independencia de ello, luego se puede dar más peso a la que convenga, según vaya evolucionando la optimización, y además, en cualquier caso, se pueden analizar las prestaciones del sistema en cualquier longitud de onda.

Tanto las longitudes de onda, como los campos se introducirán con su debido peso de importancia. En el Apéndice C se encuentra la exposición detallada de los modelos ópticos de PANIC y ahí se pueden encontrar las longitudes de onda, los campos y sus correspondientes pesos usados en nuestro caso.

A continuación se procede a la modelización del sistema óptico, en primer lugar la localización y dimensiones de la pupila de entrada del sistema, y seguidamente mediante la introducción de los parámetros que definen cada uno de los elementos de que consta.

El modelo de PANIC también incluye los componentes ópticos del telescopio. En el Apéndice B se encuentran las características detalladas del telescopio que han sido introducidas en el software *Zemax* para la simulación del mismo.

El sistema de referencia utilizado en el modelizado se define de la siguiente forma:

- Eje Z: eje óptico del sistema, positivo en la dirección inicial de propagación de la luz;
- Eje X: Eje sagital, se encuentra contenido en el plano imagen;
- Eje Y: Eje tangencial, se encuentra contenido en el plano imagen.

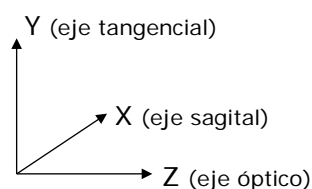


Imagen 4-2: Sistema de referencia utilizado en el modelizado de los sistemas ópticos en *Zemax*.

Todas las superficies ópticas se definen con respecto al eje óptico, el cual es siempre paralelo al eje Z. La distancia entre las superficies ópticas se mide a lo largo del eje óptico.

4.1.5. OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA ÓPTICO

La optimización del sistema es el cuarto paso en el proceso del diseño óptico. Para ello, previamente es necesario seleccionar las figuras de mérito de las prestaciones ópticas que ha de cumplir el sistema y el establecimiento de las variables en el sistema que pueden ser optimizadas y las ligaduras que lo constriñen.

- Selección de las figuras de mérito

En nuestro caso las figuras de mérito principales para la solución global de la cámara son:

- la calidad de imagen (Tabla 3–2) en todo el rango espectral y en todo el campo de visión (Tabla 3–1) y
- la distorsión geométrica (Tabla 3–2)

Conforme se va desarrollando el diseño se incluyen otras figuras de mérito que habrá que cumplir, como son el ángulo máximo permitido sobre los filtros, la calidad de la pupila reimaginada y ligaduras debidas a la geometría de las lentes.

La calidad de imagen establecida en los requerimientos científicos está expresada en términos del D_{EE80} (ver Tabla 3–2), el cual expresaremos en μm .

La distorsión se puede medir directamente en *Zemax*, para cada longitud de onda de interés, mediante un operando que calcula el cociente entre la localización de la imagen en el sistema (aberrada) y su localización ideal, y se expresa en tanto por ciento. Mencionar que esta aberración óptica no resulta en una degradación de la imagen, sino que provoca que la imagen aparezca deformada a causa de un incremento o descenso gradual del aumento lateral desde el centro hasta el extremo del campo de visión. Puede y debe ser corregida por el software de procesamiento de imágenes del instrumento.

Para determinar hasta qué punto tendremos que optimizar nuestro sistema óptico es conveniente ver cuáles son los limitantes del diseño. En este instrumento son dos: por un lado el límite de *Airy*, y por otro el *seeing* atmosférico.

Respecto del primero, usando la expresión [3.16], se calcula el FWHM del disco de *Airy* para ambas configuraciones ópticas requeridas y para la banda **K** ($2.1 \mu\text{m}$). Haciendo uso de las ecuaciones [3.17] y [3.18] se puede trasladar el FWHM a D_{EE80} .

Respecto al segundo, recordemos que en la banda **K**, para el cielo del observatorio de Calar Alto (sección 3.2) se reportaba un valor de un FWHM $\sim 0.7 \text{ arcsec}$. Para su comparación, se traslada este valor, primero a D_{EE80} , de nuevo usando las ecuaciones [3.17] y [3.18], y luego expresándolo en μm mediante la escala de píxel de cada configuración óptica.

En la Tabla 4–3 se resumen los resultados de estos cálculos de los que se concluye que el sistema no está limitado por difracción pero sí por el *seeing* atmosférico. De este modo, en lo que concierne a la optimización del sistema, se establece un compromiso entre la calidad óptica necesaria a alcanzar y su coste e implementación. Así no es necesario optimizar el sistema por debajo del límite de difracción pues no es requerido y además resultaría en unas especificaciones detalladas de la óptica muy demandantes tanto en su fabricación como en su montaje y alineado.

En Zemax no existe manera directa de optimizar por el D_{EE80} por lo que el usar este parámetro, especialmente en los diseños iniciales que se encuentran muy lejos de especificaciones, requería de gran tiempo de computación y no aseguraría resultados óptimos. Por ello, en la fase de optimización en *Zemax*, es más práctico usar el tamaño geométrico de la imagen en el plano focal del sistema, definido por el **radio rms**, que da cuenta de la concentración fotométrica del sistema. El criterio para esta optimización viene dado por la traslación del requerimiento científico a esta métrica (recordemos que lo haremos usando la ecuación [3.20]). En la Tabla 4–3 se presenta también este cálculo. Luego, para la evaluación final del sistema existe en *Zemax* una herramienta que puede medir la magnitud D_{EE80} .

D_{EE80}		Configuración óptica de PANIC	
		0.45 arcsec/px	0.25 arcsec/px
Requerimiento científico para todo el rango espectral	μm	≤ 36	≤ 54
Disco de <i>Airy</i> a 2.1 μm	μm	12.3	22.2
<i>Seeing</i> 0.7 arcsec en K	μm	42.7	76.8
Radio rms		0.45 arcsec/px	0.25 arcsec/px
Requerimiento científico para todo el rango espectral	μm	≤ 10.03	≤ 15.05

Tabla 4–3: Calidad óptica requerida para PANIC y su comparación con el límite de *Airy* y el *seeing* atmosférico de CAHA.

- Establecimiento de las variables y las ligaduras

Con respecto a las variables del sistema se incluyen: los radios de curvatura de las superficies ópticas, los espesores de las lentes, los espacios entre lentes, si hay superficies con inclinación o descentrado, los materiales ópticos y sus características (índice de refracción, dispersión cromática).

Las ligaduras del sistema son: la focal del sistema, la relación focal $F\#$, la longitud total, los materiales disponibles para los elementos ópticos, los espesores máximos y mínimos de las lentes (dependerán del tamaño disponible de los sustratos ópticos y del proceso de fabricación de las lentes), las distancias máximas y mínimas entre elementos ópticos, el espesor mínimo de las lentes en el borde (por razones de montaje en criogenia, como se ha mencionado en la sección 3.5) y los ángulos específicos requeridos sobre los filtros (en particular, para los filtros estrechos se establece un valor menor a 10°).

- Optimización

Para proceder a la optimización se define una **función de mérito** (denominada "*Merit function*" dentro del programa *Zemax*) en la que se introducen los operandos. Los operandos son los parámetros que se desea que tengan un valor determinado y que contienen la información de las figuras de mérito seleccionadas (calidad de imagen, aberraciones, etc.) así como las condiciones de contorno (distancia focal del sistema, valores de las curvaturas, espesores de los elementos ópticos, distancias, materiales,

etc.). Cuando se definen los operandos se les asigna el valor deseado y el correspondiente peso.

La función de mérito es una función de los parámetros que describen la calidad del sistema y es una representación numérica de cuánto de cerca está el sistema óptico de los operandos definidos. Esta función se define de forma que el valor cero es el ideal. El algoritmo de optimización intenta conseguir, por iteración, el mínimo de la función de mérito en función de las variables que se hayan definido. La selección de las condiciones iniciales en el proceso de optimización es vital porque ello determina de forma unívoca el mínimo de la función de mérito.

El proceso de optimización no se realiza de forma secuencial, es un proceso iterativo. Durante las primeras optimizaciones se intenta tener cuantas menos variables mejor y, una función de mérito cuanto más pequeña mejor. Progresivamente durante el proceso de optimización se va evolucionando el diseño y se pueden ir añadiendo otras variables si no se consigue cumplir los criterios requeridos. Por ejemplo añadir más lentes, o términos esféricos a las superficies ópticas, o añadir conicidad a las mismas. En función de la evolución del sistema se irán variando los materiales, los pesos de los distintos campos y/o de las longitudes de onda con el objetivo de conseguir un sistema que cumpla las figuras de mérito requeridas.

4.1.6. LA EVALUACIÓN DEL SISTEMA ÓPTICO

El siguiente paso es la evaluación del diseño, que dependiendo de la fase del proyecto tiene distinto alcance. El protocolo de evaluación del sistema óptico óptimo consiste en la comprobación de que el diseño cumple las figuras de mérito establecidas y los requerimientos. Es importante en este punto tener recopilado todo el conjunto de las especificaciones del sistema a diseñar, los parámetros a determinar y los criterios de evaluación. En la Tabla 4-4 se encuentran recopiladas las especificaciones del sistema con repercusión en el diseño óptico contra la que se ha de verificar el sistema diseñado.

El sistema se optimiza hasta un punto tal que cumple dichas especificaciones, y con el margen, previamente estimado por el diseñador óptico, para dejar tolerancia a los errores de fabricación, montaje y operación del sistema óptico en diseño.

Una parte de los requerimientos del diseño se evalúan usando el software de ingeniería óptica, *Zemax* (como se ha mencionado en la sección anterior), y otras mediante análisis con otras herramientas y/o en colaboración con otras áreas del proyecto.

Zemax posee una serie de herramientas de análisis que proporcionan tanto gráficos como datos numéricos. Los resultados generados por estas herramientas permitirán evaluar la calidad y rendimiento del sistema durante todas las etapas de la optimización del mismo.

	PANIC 0.45 arcsec/px	PANIC 0.25 arcsec/px
Parámetros básicos del sistema		
Telescopio	T22	
Estación focal	Foco RC	
Modo de operación	Imagen, en todo el FoV	
Distancia objeto paraxial, a	-25860 mm	-32460 mm
Distancia imagen paraxial, a'	12120 mm	27370 mm
Longitud focal efectiva	8251 mm	14851 mm
Relación focal F#	3.750	6.75
Magnificación lateral	0.4685	0.8433
Pupila de entrada	Espejo primario del telescopio	
Diámetro de la Pupila de entrada	2200 mm	
Rango espectral	(0.8 – 2.42) μm	
Detector infrarrojo	(4096 \times 4096) px	
Espacio entre detectores	147 px	
Tamaño del píxel	18 μm	
Rango espectral de sensibilidad del detector	(0.3 – 3) μm	
Escala de placa	0.45 arcsec/px	0.25 arcsec/px
	25.0 arcsec/mm	13.9 arcsec/mm
FoV	(4096+147) \times (4096+147) px	
	(76.374 \times 76.374) mm	
	(31.82 \times 31.82) arcmin	8 arcmin \leq Diámetro \leq 17.7 arcmin
Plano focal	Plano	
Sistema óptico		
Tipo	Refractivo	
Imagen de la pupila de entrada	Disponibile para introducir un diafragma de apertura en frío dentro del tren óptico	
Elementos	2 barriles para reimaginación pupila 2 aplanadores de campo	
Tipo de superficies	Esféricas Minimizar número de esféricas y cónicas	
Filtros anchos	Z, Y, J, H y K_s	
Filtros estrechos	FWHM/ λ_c 100 \leq 1%	
Geometría de las lentes	Implementación de chaflanes en el borde Grosor borde min. 6.5 mm	
Rendimiento óptico		
Calidad de imagen	$D_{EE80} \leq 0.9$ arcsec=2 px radio rms ≤ 10.04 μm	$D_{EE80} \leq 0.75$ arcsec=3 px radio rms ≤ 15.05 μm
Distorsión	≤ 1.5 %	
Transmisión	Maximizar en todo el rango espectral	
Filtros estrechos: desplazamiento permitido en su λ_c	≤ 0.3 %	
Degradación del diámetro la pupila fría	≤ 3 %	

	PANIC 0.45 arcsec/px	PANIC 0.25 arcsec/px
Empaquetamiento		
Peso	≤ 400 kg	
Longitud desde el plano focal	≤ 110 cm	
Distancia focal trasera	> 10 mm	
Radiometría		
Fondo térmico	A minimizar, en especial en la banda K	
Minimización de la luz difusa	Optimizado para la banda K	
Diafragma de apertura	Diafragma de apertura frío	
Diafragma de campo	Diafragma de campo frío	
Fantasmas: intensidad relativa	$< 10^{-4}$	
Fantasmas: tamaño en el detector	> 10 arcsec (si la intensidad relativa no se cumple)	
Recubrimiento antirreflejante	En todas las superficies	
Condiciones de operación		
Sistema	Contenido en criostato	
Temperatura (nitrógeno líquido)	~ 80 K	
Presión	10^{-6} mbar	
Mecanismo de enfoque	Espejo secundario del telescopio	
Verificación alineado del diafragma de apertura frío	Implementar un reimaginador de pupila Optimizado para la banda K	

Tabla 4–4: Lista de especificaciones con impacto en el diseño óptico de la cámara.

4.1.7. PRESUPUESTO DE ERRORES

Por último el sexto paso es el cálculo de las tolerancias y la realización del presupuesto de errores del diseño óptico, con el objetivo final de llevar el sistema a fabricación y su correcto funcionamiento. Ningún diseño está completo hasta que no se evalúen las tolerancias del mismo. El cálculo de tolerancias del sistema para distribuir los errores de fabricación de todos los componentes ópticos y opto-mecánicos y los errores de montaje ha de ser tal que asegure que el sistema sea fabricable y cumpla todos sus requerimientos ópticos a un coste y tiempo de producción admisibles. También se ha de tener en cuenta la minimización del proceso de integración y alineado del sistema, tanto en tiempo como en importe. Además, el presupuesto de errores ayuda a la predicción del rendimiento/comportamiento óptico del sistema.

Durante el proceso de diseño se monitorean las tolerancias para determinar qué parámetros son más sensibles y así poder reaccionar pronto en las etapas tempranas del diseño y tomar medidas para relajar dichos parámetros, bien mediante el rediseño de algunos componentes, o con el establecimiento de compensadores ópticos o mecánicos. Esto implica una estrecha colaboración con el diseño mecánico y criogénico, por un lado, y con los fabricantes por otro.

4.2. FASE DE DISEÑO ÓPTICO PRELIMINAR

La fase de PDR del instrumento completo comienza en octubre de 2006, justo tras la reunión de inicio de proyecto celebrada en Granada en ese mismo mes. Y culmina con el informe de evaluación del panel de revisores emitido a final de noviembre de 2007.

Durante esta etapa del desarrollo del instrumento se valida el concepto global del mismo y se establece un diseño preliminar, tal que cumple los requerimientos científicos. Se desarrolla un estudio teórico y la modelización del diseño en todas sus áreas hasta un detalle tal que se pueda demostrar que el sistema es realizable y se garantiza que funcionará adecuadamente.

La documentación producida durante esta fase se enumera a continuación:

- 1) PANIC Preliminary Design Report (Fried, et al., 2008)
- 2) PANIC Scientific Requirements (Verdes-Montenegro, Fernandez, Rodriguez, & Cardenas Vazquez, 2007, October)
- 3) PANIC-Nota técnica-Signal to Noise analysis (Sánchez-Blanco, Cárdenas Vázquez, & Fernández, Signal to Noise cases, 2007, March)
- 4) PANIC-Nota técnica-Second Pixel Scale Study (Cárdenas Vázquez & Rodríguez Gómez, PANIC: Second Pixel Scale study, 2007, July)
- 5) PANIC-Nota técnica-Glass Catalogue (Sánchez-Blanco & Cárdenas Vázquez, Glass catalogue, 2007, June)
- 6) PANIC-Nota técnica-Tolerance Analysis (Cárdenas Vázquez & Rodríguez Gómez, Tolerance Analysis, 2007, October)
- 7) PANIC-Nota técnica-Optical Assembly, Integration and Verification. (Sánchez-Blanco, Cárdenas Vázquez, & Rodríguez Gómez, Optical Assembly, Integration and Verification. Preliminary Design AIV., 2007, October)

Esta documentación engloba: el informe describiendo el diseño del instrumento en todas sus áreas, 1); el documento de requerimientos científicos, 2); y una serie de notas técnicas con los análisis ópticos necesarios para la justificación del diseño presentado, 3) a 7).

La contribución de la doctoranda a estos documentos se encuentra en:

- la parte de Óptica del documento 1), en las páginas: 1-20, 23-27 y 44-86.
- y en todas las notas técnicas presentadas.

4.2.1. EL DISEÑO ÓPTICO PRELIMINAR

Todos los detalles del diseño se pueden hallar en el documento de PDR (Fried, et al., 2008) disponible en la página web de PANIC (PANIC Panoramic Near-Infrared Camera).

El diseño incluye el diseño óptico del telescopio T22 y el de la cámara modelizado éste en las condiciones de trabajo criogénicas, ya que las características ópticas y mecánicas de los materiales varían con la temperatura.

La nota técnica 5) describe en detalle la modelización de los materiales ópticos a 80 K, por un lado, su índice de refracción varía no solo con la longitud de onda sino también con la

temperatura que afecta a la marcha de rayos; y por otro lado, su coeficiente de dilatación térmica entre temperatura ambiente 293 K y la temperatura de trabajo, 80 K, lo que afecta tanto al espesor como a la curvatura de la lente.

Se incluyen en esta fase del diseño asimismo los análisis de calidad de imagen obtenida, el análisis preliminar de fantasmas y estudio de luz difusa, el análisis de tolerancias ópticas y opto-mecánicas y el plan de alineado, montaje, integración y verificación preliminar (AIV, del inglés *Assembly, Integration and Verification*).

El diseño óptico preliminar de PANIC presentado en PDR se describe brevemente a continuación:

- Es una cámara que se acopla al foco RC del T22 (Imagen 4-3).
- Consiste en un único tren óptico refractivo y todas las superficies esféricas (ni esféricas, ni cónicas), con tres espejos planos para doblar el camino óptico y empaquetar la cámara en su dirección axial, la dimensión lateral no es crítica (Imagen 4-4, Imagen 4-5 y Imagen 4-6).
- Comienza antes del plano focal del telescopio haciendo así posible la instalación del diafragma de campo frío (Imagen 4-4 y Imagen 4-5).
- Produce una pupila interna que es físicamente accesible para la instalación del diafragma de apertura frío requerido para la consecuente reducción del fondo térmico en la banda **K** (Imagen 4-4 y Imagen 4-5).
- Posee dos escalas de píxel obtenidas mediante el intercambio de la óptica situada después del diafragma de apertura. Ambas escalas de píxel son independientes, se puede suprimir una de ellas sin afectar a la otra (Imagen 4-7).
- Reimagina el cielo en el detector con una relación focal de $F/3.74$, para una escala de placa de 0.45 arcsec/px que proporciona un campo de visión de (31.9×31.9) arcmin (Imagen 4-4 y Imagen 4-6).
- La segunda escala de píxel de 0.25 arcsec/px tiene una relación focal de $F/6.74$ optimizada para un campo de visión de 18 arcmin de diámetro (Imagen 4-5 y Imagen 4-6).

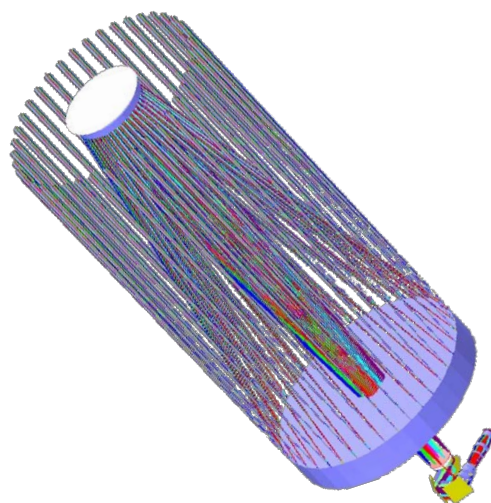


Imagen 4-3: Simulación óptica de PANIC acoplada al foco RC del T22.

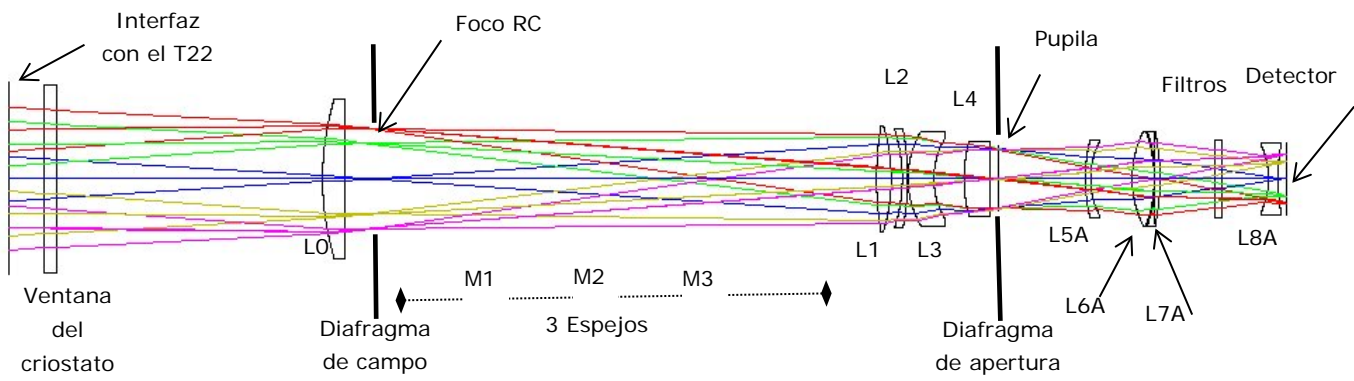


Imagen 4-4: Esquema óptico de PANIC para la escala de placa de 0.45 arcsec/px.

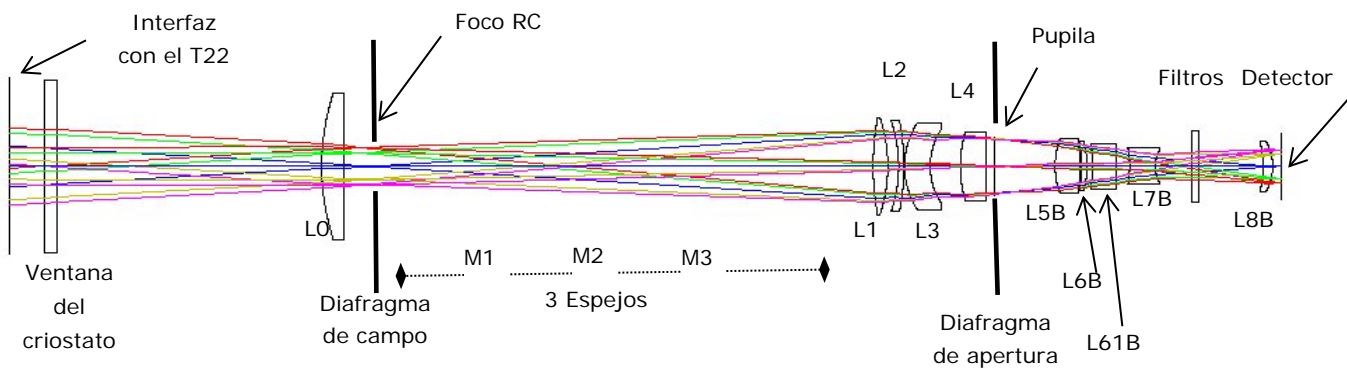


Imagen 4-5: Esquema óptico de PANIC para la escala de placa de 0.25 arcsec/px.

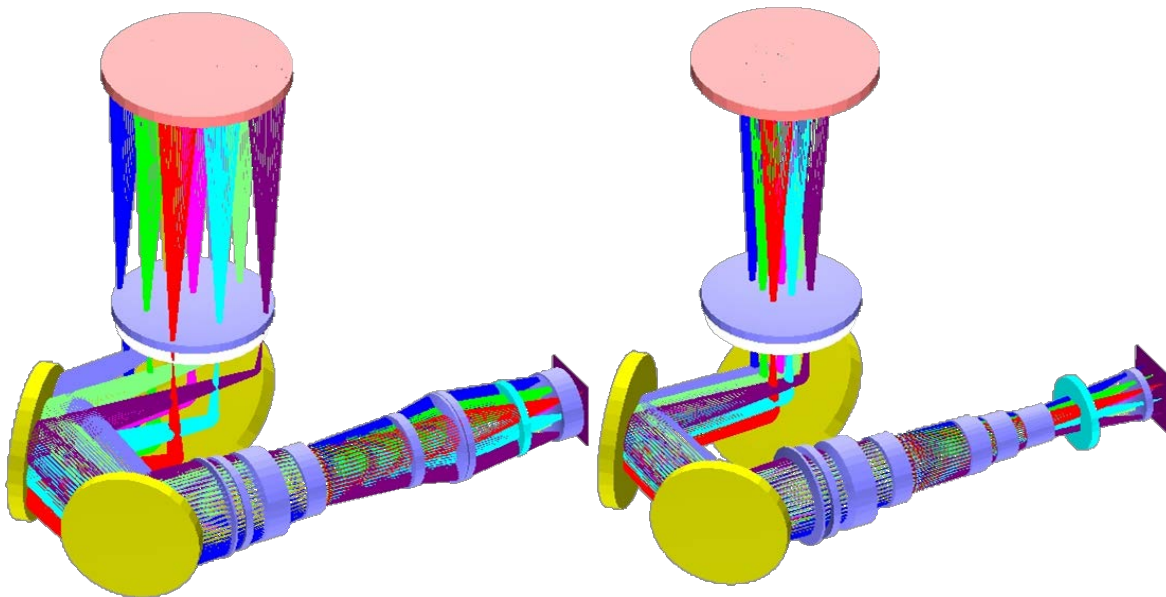


Imagen 4-6: Diseño gráfico de la óptica PANIC, a la izqda. la escala de pixel de 0.45 arcsec/px, y a la derecha la de 0.25 arcsec/px.

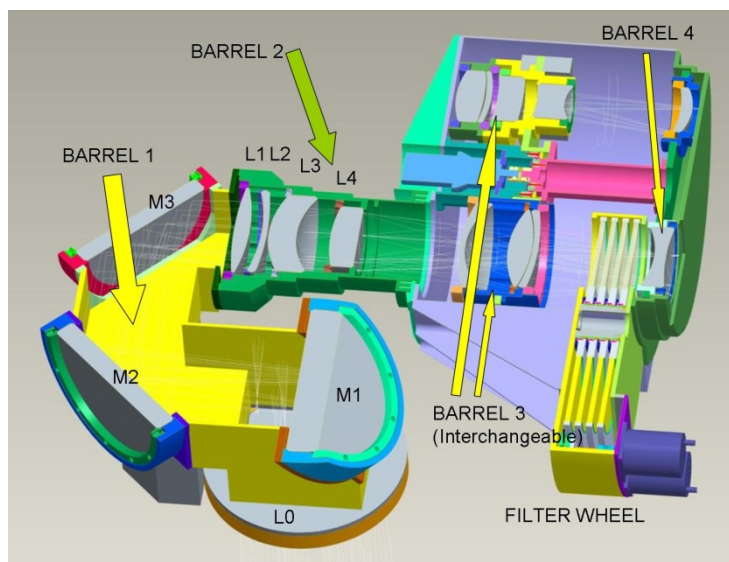


Imagen 4-7: Diseño opto-mecánico de PDR que muestra los principales subsistemas ópticos.

- Los materiales para las lentes de ambas escalas son: BaF₂, CaF₂, E-SF03, Infrasil, S-FPL51 y S-FTM16.

Éstos han sido seleccionados tal que: exista material en bruto del tamaño necesario para fabricar las lentes del sistema, que su transmitancia sea óptima en el rango espectral de trabajo, que existan datos de sus índices de refracción y coeficiente de dilatación a la temperatura de trabajo de 80 K, que sea posible alcanzar la calidad de pulido óptica requerida para la calidad de imagen del sistema, y que su relación coste-prestación se encuentre dentro del presupuesto del proyecto.

- El diámetro de las lentes para ambos trenes ópticos se encuentran en el rango entre 165 a 85 mm. La primera lente de campo, L0, tiene 250 mm de diámetro.

- El material de la ventana del criostato es Infrasil 302, fabricado por la compañía *Heraeus*. Tiene un diámetro de 300 mm y se calcula un espesor de 20 mm.

La elección de este material se justifica por: ser un material con transmitancia optimizada en el rango espectral del infrarrojo cercano; ser amorfo con lo que el riesgo de ruptura por choque térmico es muy bajo; tener un bajo CTE para minimizar el gradiente térmico que sufrirá debido a la temperatura exterior e interior del criostato; y tener un alto módulo de ruptura, para minimizar el riesgo de ruptura por diferencia de presión.

El grosor necesario para una ventana de 300 mm de diámetro ha sido calculado usando la siguiente expresión que se puede encontrar en la bibliografía:

$$e_{\text{ventana}} = \sqrt{\frac{K_u \cdot R^2 \cdot \Delta P \cdot SF}{E}} \quad [4.8]$$

donde e_{ventana} es el grosor de la ventana, K_u es una constante empírica que para ventanas circulares sin sujetar (como el caso de la ventana de PANIC) es igual a 1.125, R es el radio de la ventana, ΔP es la diferencia de presión que soportará, en este caso 1 atm, SF es el factor de seguridad considerado, en este caso igual a 6, y E es el módulo de ruptura del Infrasil, 50 MPa. Usualmente se usa un factor de seguridad de 4, pero dada la gran dimensión de esta ventana y para contemplar la situación más pesimista se decidió incrementar hasta 6 y tener más margen de seguridad. Sin embargo, la prueba final de

que esta decisión fue la adecuada se conocerá al hacer el primer ciclado del criostato con la ventana instalada y ésta sobreviva.

Por otro lado, se puede calcular que la deflexión que sufre esta ventana debido a la diferencia de presión es de un máximo de 25 μm en el centro, que equivaldría a una curvatura de la superficie de la ventana de 565 m. Es decir el efecto en la calidad de imagen es despreciable.

- Los filtros se encuentran en haz convergente, cerca del detector, en una posición tal que la variación del ángulo de incidencia sobre los mismos debido a la dependencia con el campo es mínima, y por tanto los filtros interferenciales estrechos sufran un desplazamiento de su longitud central menor al 0.3% requerido.

- El reenfoque al cambiar de filtro se puede hacer mediante el espejo secundario del telescopio.

- Se ha minimizado la luz difusa mediante: la implementación del diafragma de apertura frío y del diafragma de campo frío, el sobredimensionado de las lentes de un 5% (para evitar luces parásitas debido a los bordes) y al no usar técnicas de pulido por diamante en las superficies ópticas para minimizar la microrugosidad de las superficies ópticas (gran contribuyente a la luz difusa).

En la siguiente fase del proyecto se hará un análisis completo de luz difusa que permitirá la especificación detallada de los baffles mecánicos a implementar en el tren óptico.

- El análisis de fantasmas presentes en el sistema revela que ni los elementos más susceptibles de provocar fantasmas, como son ambas caras de la ventana de entrada del criostato, los filtros o la lente L0, provocan un efecto apreciable en la imagen.

- El análisis preliminar de tolerancias pone de manifiesto la necesidad de relajar algunos componentes críticos mediante compensadores mecánicos.

Este análisis de tolerancias se hace para acotar los errores de fabricación y los márgenes para los errores permisibles durante la integración y ajuste del sistema. El diseño mecánico presentado en el PDR (Imagen 4-7), y realizado por el equipo de PANIC, proporciona la disposición mecánica (Imagen 4-8 e Imagen 4-9) considerada para hacer dicho análisis.

En la etapa siguiente del proyecto se hará un análisis más profundo para incluir los errores asociados al índice de refracción de los vidrios, errores térmicos y de estabilidad de imagen al ser PANIC un instrumento en movimiento durante su operación por estar acoplado al foco del telescopio.

Optical element	L0	M1	M2	M3	L1	L2	L3	L4	L5A	L6A	L7A	L8A
Groups	barrel 1				lens mount 2				lens mount 3A			4A
	optics mount 1								optics wheel			
	complete optics											

Imagen 4-8: Agrupamiento mecánico de PANIC para la escala de píxel de 0.45 arcsec/px.

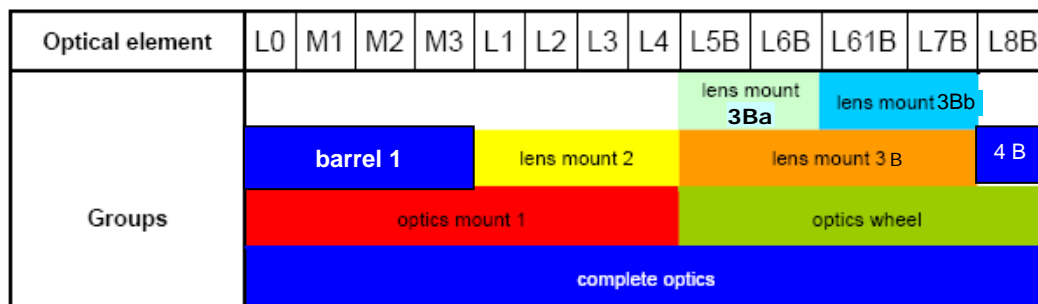


Imagen 4-9: Agrupamiento mecánico de PANIC para la escala de píxel de 0.25 arcsec/px.

En primer lugar, mediante un análisis de sensibilidad se identifican los elementos más críticos en el diseño óptico.

Respecto a las tolerancias de fabricación de las lentes, en la mayoría de ellas, el error de ángulo (denominado *wedge*) entre ambas superficies ópticas resultante es menor de 1 arcmin (que trasladado a error en el borde, resultaba en el rango de las 25 μm o menores, teniendo en cuenta el diámetro de cada elemento óptico). Este valor queda muy por debajo de los 3 arcmin (en términos de error en el borde, en el rango de 100 a 150 μm) considerados como estándar en la fabricación fina de lentes. También los grosores de algunas resultan muy críticos. Ello encarecería enormemente el proceso de fabricación y más teniendo en cuenta que las lentes debían tener chaflanes en su borde a ambos lados. Respecto a las sensibilidades de posicionamiento, tanto de los elementos ópticos individuales, como de los barriles, resultan en valores de descentrado X e Y menores a las 50 μm y de giro con respecto a esos ejes menores de 1 arcmin, haciendo muy exigente tanto los requerimientos para las monturas de las lentes como el proceso de alineado del sistema.

Para relajar las tolerancias de los elementos críticos y absorber los errores de fabricación, se planean, por un lado, dos compensadores en la separación entre las lentes L1 y L2, y otro entre las lentes L6B y L61B, ambos con un rango menor de 0.3 mm; y por otro, dos compensadores de descentrado, uno situado en L2, y otro dentro de cada escala de píxel, en L6A para la 0.45 arcsec/px y en L5B para la de 0.25 arcsec/px. El rango de cambio necesario de desplazamiento de estos últimos es inferior a 0.6 mm en ambos ejes.

En segundo lugar, con estos compensadores implementados, se determinan las tolerancias de todos los elementos para su fabricación, el posicionamiento requerido para los elementos y subsistemas, así como el rango necesario de los compensadores.

Resumidamente, para las lentes y los espejos los valores de las tolerancias de fabricación están dentro del rango estándar de los fabricantes de óptica para elementos ópticos de ese tamaño y son:

Elemento	Radios de curvatura	Espesor	<i>Wedge</i>	Planitud (<i>fringes @ 632.8 nm</i>)
Lentes	$\pm 0.1\%$	$\pm 100 \mu\text{m}$	$\pm 3.00 \text{ arcmin}$	--
Espejos	--	--	--	1
Filtros	--	$\pm 100 \mu\text{m}$	$\pm 3.00 \text{ arcmin}$	1-1

Tabla 4-5: Tolerancias de fabricación para los elementos ópticos.

donde "*wedge*" es el ángulo de inclinación que forma una superficie de la lente con respecto a la otra, y "*fringes*" es el número de franjas de interferencia de la superficie óptica en cuestión en un interferograma obtenido en reflexión contra una superficie plana (**1 *fringe*** equivale a un P-V WFE de $\lambda/2$).

La medida de la planitud de la superficie óptica da cuenta del WFE que produce esta superficie y que contribuirá al WFE total del sistema, por tanto, a la calidad de la imagen del mismo.

Para el posicionado mecánico del sistema y ajuste de los elementos individuales y de los distintos subsistemas se obtienen rangos dentro de estos márgenes:

Elemento	Descentrado X e Y	Posición Z	Inclinación con respecto X e Y
Ventana criostato Lentes Espejos	$\pm 100 \mu\text{m}$	$\pm 200 \mu\text{m}$	$\pm 3.00 \text{ arcmin}$
Barriles	$\pm 100 \mu\text{m}$	$\pm 200 \mu\text{m}$	$\pm 3.00 \text{ arcmin}$
Filtros	$\pm 200 \mu\text{m}$	$\pm 200 \mu\text{m}$	$\pm 3.00 \text{ arcmin}$
Detector	--	$\pm 200 \mu\text{m}$	$\pm 3.00 \text{ arcmin}$
Instrumento completo	$\pm 1 \text{ mm}$	$\pm 200 \mu\text{m}$	$\pm 6.00 \text{ arcmin}$

Tabla 4–6: Tolerancias preliminares de posicionado mecánico para los distintos elementos del sistema completo.

- Se demuestra que el plan preliminar de AIV del sistema a nivel óptico es viable y determina las pruebas ópticas de ingeniería y el equipo necesario para llevarlas a cabo. Este plan está basado en una división en tres grandes categorías: la fabricación de los elementos ópticos y sus pruebas de aceptación, bien en fábrica o bien con una posterior verificación a su recepción; la integración, ajuste y pruebas de verificación de los distintos subsistemas; y la integración, montaje y pruebas de ingeniería final del sistema completo.

- El diseño cumple requerimientos y contiene margen para tolerancias de fabricación de sus componentes y el montaje y alineado del sistema, según se demuestra en la nota técnica respecto al análisis de tolerancias, 6) referida en la lista de documentos de PDR, y en el documento de PDR propiamente dicho.

En la Tabla 4–7 se listan los requerimientos y especificaciones que ha de tener en cuenta el diseño óptico, así como su verificación para ambas escalas de píxel de PANIC en esta fase del proyecto.

Por completitud también se muestra el peso de ambas escalas de píxel para hacer patente el incremento de peso del instrumento entre tener la escala de píxel primigenia o tener ambas.

Parámetro	Requerimiento	PANIC
Telescopio	T22	✓
Estación focal	Foco RC	✓
Modo de operación	Imagen, en todo el FoV	✓
Pupila de entrada	Espejo primario del telescopio	✓
Diámetro de la Pupila de entrada	2.200 mm	✓
Rango espectral	(0.8 – 2.42) μm	✓
Sistema	Contenido en criostato	✓
Temperatura (nitrógeno líquido)	~ 80 K	✓
Presión	10^{-6} mbar	✓
Mecanismo de enfoque	Espejo secundario del telescopio	✓
Tipo de sistema óptico	Refractivo	✓
Tipo de superficies	Esféricas y planos Minimizar número de esféricas y cónicas	Esféricas y planos
Elementos	2 barriles para reimaginación pupila 2 aplanadores de campo	✓
Geometría de las lentes	Implementación de chaflanes en el borde Grosor borde min. 6.5 mm	✓
Filtros anchos	Z, Y, J, H y K_s	✓
Filtros estrechos	FWHM/ λ_c 100 ~ 1%	✓
Filtros estrechos:	desplazamiento permitido en su $\lambda_c \leq 0.3$ %	✓
Imagen de la pupila de entrada	Disponible para introducir un diafragma de apertura en frío dentro del tren óptico	✓
Calidad de imagen de la pupila reimaginada	Pérdida de flujo en la banda K: < 10%	< 2%
Diafragma de apertura	Frío	✓
Degradación del diámetro la pupila fría	≤ 3 % en la banda K	✓
Diafragma de campo	Frío	✓
Reducción de luz difusa	Optimizado para la banda K	✓
Fantasmas: intensidad relativa	$< 10^{-4}$	✓
Fantasmas: tamaño en el detector	> 10 arcsec (si la intensidad relativa no se cumple)	✓
Longitud total desde ventana de entrada del criostato	Igual para ambas escalas de pixel	1925.36 mm
Longitud desde el plano focal	≤ 110 cm	✓
Distancia focal trasera	> 10 mm	✓
0.45 arcsec/px		
Parámetro	Requerimiento	PANIC
Longitud focal efectiva	8250.6 mm	✓
Relación focal F#	3.746	✓
Magnificación lateral	0.468	✓
Escala de placa	0.45 arcsec/px	0.45 arcsec/px
FoV	30' x 30'	(31.82 x 31.82) arcmin
Calidad de imagen	$D_{EE80} \leq 0.9$ arcsec = 2 px = 36 μm	$D_{EE80} \leq 0.75$ arcsec = 1.7 px = 29.8 μm
Distorsión	≤ 1.5 %, para todas las bandas espectrales	< 1.32 % max. (esquina)
Transmisión	Maximizar en todo el rango espectral	~ 45% (window+9 lentes)
Peso (solo escala de pixel principal)	≤ 400 kg	385 kg

0.25 arcsec/px		
Parámetro	Requerimiento	PANIC
Longitud focal efectiva	14840 mm	✓
Relación focal F#	6.743	✓
Magnificación lateral	0.842	✓
Escala de placa	0.25 arcsec/px	0.25 arcsec/px
FoV	8 arcmin ≤ Diámetro ≤ 17.8 arcmin	18.32' diámetro
Calidad de imagen	$D_{EE80} \leq 0.75 \text{ arcsec} = 3 \text{ px} = 54 \mu\text{m}$	$D_{EE80} \leq 0.58 \text{ arcsec} = 2.3 \text{ pix} = 41.4 \mu\text{m}$
Distorsión	≤ 1.5 %, para todas las bandas espectrales	< 0.22 % max. (esquina)
Transmisión	Maximizar en todo el rango espectral	~ 43% (window+10 lenses)
Peso (incluyendo ambas escalas de píxel)	≤ 400 kg	463 kg

Tabla 4–7: Lista de especificaciones y su verificación para ambas escalas de píxel de PANIC.

4.2.2. REVISIÓN DE PDR E INFORME DEL PANEL DE REVISORES

Esta etapa finaliza con una revisión de diseño preliminar que tiene lugar en Granada en noviembre de 2007 que incluye también los requerimientos, la solución propuesta para el instrumento y el plan de trabajo. El panel internacional de revisores expertos en instrumentación infrarroja estuvo formado por:

- Klaus-Werner Hodapp (*University of Hawaii Institute for Astronomy*),
- Rainer Lenzen (MPIA),
- Jeff Pirard (*European Southern Observatory*) y
- Vicente Sánchez (Instituto de Astrofísica de Canarias).

El diseño es aprobado en PDR tras el informe (Hodapp, Lenzen, Pirard, & Sánchez, 2007) favorable de los revisores, emitido en base a la revisión de la documentación previamente enviada y a la defensa del diseño que el equipo de PANIC realiza durante la revisión de PDR. Dicho informe concluye que:

- El equipo de PANIC está altamente comprometido y motivado para realizar este proyecto dentro del plan previsto.
- No identifica ningún fallo crítico en la solución técnica principal, la cual se aprueba completamente.

Además los revisores hacen una serie de recomendaciones al proyecto, de las cuales aquellas que tuvieron un mayor impacto sobre el diseño óptico fueron:

- Descartar la segunda escala de píxel, de 0.25 arcsec/px, dado que, a pesar de presentar una apropiada solución óptica, produce otros problemas (exceso de los límites del telescopio, mecanismos criogénicos, alineado e incremento del tiempo de finalización del proyecto y su coste).
- Incluir un sistema óptico para la reimaginación de la pupila del sistema y así permitir su alineado en telescopio.
- Confirmación de incluir compensadores mecánicos en el sistema para relajar las especificaciones de los componentes ópticos más críticos.

El PDR establece la línea base del instrumento para las siguientes fases del proyecto y valida la robustez del diseño.

4.3. FASE DE DISEÑO ÓPTICO FINAL

La siguiente fase de desarrollo del instrumento, FDR, comienza tras la revisión de PDR, en diciembre de 2007. La finalidad de esta fase es establecer un diseño completo en todos sus detalles tal que esté listo para ser fabricado, integrado y verificado.

Tras la revisión preliminar se hace un replanteamiento del resto del proyecto en base a las recomendaciones del panel de revisores con el objetivo de congelar el diseño óptico y trabajar en la solución aceptada.

Las dos decisiones principales que afectan directamente al diseño óptico son:

- la eliminación de la segunda escala de píxel, pero a cambio hacer el diseño óptico viable para trabajar en el T35 para obtener una escala de píxel de 0.23 arsec/px, y
- la implementación de un reimaginador de pupila para alinear el diafragma de apertura frío de PANIC con el espejo primario del telescopio durante la operación del instrumento.

Además, llegado este punto del proyecto, el equipo de trabajo de PANIC ya tiene suficiente información, gracias a las primeras iteraciones con los fabricantes, como para saber que el contrato más largo en el tiempo sería el de la fabricación de las lentes, debido tanto a la espera de los materiales en bruto (que suele ser de unos cuatro meses), como a la producción de los chaflanes.

A nivel de proyecto, para evitar un retraso en la finalización del mismo, se toma la decisión de hacer una revisión de diseño final por partes, primero del diseño óptico, y así lanzar los contratos de fabricación de las lentes, y después del resto de áreas del instrumento. La fase de FDR de la Óptica termina con el informe de evaluación del panel de revisores emitido a principios de octubre de 2008. La fase de FDR del resto de áreas del instrumento culmina en diciembre de 2009.

Partiendo del diseño preliminar validado en PDR, ahora, durante el diseño final tan solo se realiza, como veremos, pequeños cambios en el diseño con el fin de disminuir los riesgos de fabricación, reducir costes, adaptarlo a las especificaciones del fabricante y a las especificaciones mecánicas del montaje y ajuste del sistema. Sin embargo, esta etapa conlleva unos análisis y simulaciones más profundas para llevar el sistema a su fabricación y generar las especificaciones técnicas detalladas de los elementos individuales y sus planos de fabricación e incluso obtener presupuesto de fabricación de los distintos elementos ópticos.

El diseño óptico final resultante es un diseño detallado que cumple los requerimientos científicos, es posible su fabricación en todos sus aspectos y cumple con las especificaciones impuestas por las distintas interfaces permitiendo su correcto montaje y funcionamiento. El objetivo de esta fase es que a su conclusión, después de la revisión de diseño final, los distintos contratos para la fabricación de los componentes ópticos puedan ser realizados.

Así, pues, esta fase comprende las siguientes actividades:

- Realizar las simulaciones del sistema óptico completo en un ambiente criogénico, a una temperatura de 100 K y, por tanto, alto vacío, dado que son las condiciones nominales de trabajo de la cámara. Ello implica modelización de materiales ópticos a esa

temperatura y a esa presión, así como su implementación en el programa de ingeniería de diseño óptico. Modelización de su índice de refracción y de su coeficiente de expansión térmica.

- Efectuar las interacciones necesarias con ingenieros mecánicos, criogénicos y de detectores para implementar en el diseño óptico final las modificaciones requeridas por parte de dichas áreas con el objetivo de que el instrumento sea fabricable.
- Efectuar un análisis de tolerancias, por componente óptico, por barriletes, y por subsistemas opto-mecánicos para interaccionar con el diseño mecánico y térmico.
- Elaborar un presupuesto total de errores de la calidad de imagen y un análisis completo de fantasmas y de luz difusa del instrumento.
- Realizar el diseño detallado de bafleado del instrumento, y ultimar todos los detalles opto-mecánicos para su implementación en PANIC.
- Elaborar un plan de montaje, integración, alineado y verificación (MAIV, Manufacturing, Assembly, Integration and Verification) del sistema a todos los niveles.
- Establecer los requisitos de los filtros astronómicos que incorporará la cámara para la consecución de los objetivos científicos del proyecto.
- Diseño de sistemas ópticos auxiliares para el alineado en laboratorio y complementos opto-mecánicos para el AIV.
- Localizar los fabricantes de los distintos elementos ópticos, ventanas del criostato, lentes, espejos, filtros, recubrimientos, etc., pudiendo ser empresas u otros centros de investigación.
- Obtener presupuestos de fabricación de los distintos elementos ópticos.

La documentación producida durante esta fase se lista a continuación:

- 1) PANIC Final Design Report (Cárdenas Vázquez, Fernández, Fried, & Rodríguez Gómez, 2008).
- 2) PANIC Scientific Requirements (Verdes-Montenegro, Fernandez, Rodriguez, & Cardenas Vazquez, 2007, October).
- 3) PANIC-Nota técnica-Filters Specification (Sánchez-Blanco & Cárdenas Vázquez, Filters Specification, 2008, July).
- 4) PANIC-Nota técnica-Glass Catalogue (Sánchez-Blanco & Cárdenas Vázquez, Glass catalogue, 2008, May).
- 5) PANIC-Nota técnica-Ghost and Stray Light analysis (Sánchez-Blanco, Cárdenas Vázquez, & Rodríguez Gómez, Ghost and Stray Light analysis, 2008, February).
- 6) PANIC-Nota técnica- Complete Image Quality Error Budget analysis (Cárdenas Vázquez, Sánchez-Blanco, & Rodríguez Gómez, Complete Image Quality Error Budget, 2008, August).
- 7) PANIC-Nota técnica-Optical Assembly, Integration and Verification (Sánchez-Blanco, Cárdenas Vázquez, & Rodríguez Gómez, Optical Assembly, Integration and Verification, 2008, September).
- 8) Conjunto de planos de fabricación de los elementos ópticos: Entrance window, L1-L9, Pupil Imager Lens, Mirrors (Cárdenas Vázquez M. C., FDR Optical elements drawing set: Entrance window, L1 to L9, Pupil Imager Lens and Folding mirrors., 2008).

Esta documentación engloba: el informe describiendo el diseño final del instrumento correspondiente, en este caso, del área de Óptica, 1); el documento de requerimientos científicos, 2), ya aportado en PDR; una serie de notas técnicas con los análisis ópticos necesarios para la justificación del diseño de detalle presentado, 3) a 7); y por último los planos de fabricación de los distintos elementos ópticos del sistema, 8).

Excepto en el documento de requerimientos científicos, la doctoranda ha participado en la redacción y revisión de todos los documentos aportados.

Las notas técnicas correspondientes al catálogo de vidrios, 4), y al plan de AIV, 7), son actualización a la situación del diseño de FDR de las notas técnicas análogas presentadas en PDR. Sin embargo, se crean nuevas notas técnicas, que conciernen a la especificación de los filtros para trabajar en las condiciones de PANIC, 3), al estudio detallado de fantasmas y luz difusa para obtener la definición detallada de los recubrimientos antirreflejantes de las lentes y del bafleado mecánico del sistema, 5), y por último, un presupuesto completo de errores que incluye ahora todos los factores a tener en cuenta en dicho presupuesto, 6). Estas nuevas notas técnicas atienden a la necesidad de hacer unos análisis más profundos en esos puntos con el propósito de llegar a la especificación detallada de todo el sistema y tener en cuenta sus implicaciones en las interfaces con otras áreas del instrumento.

4.3.1. DISEÑO ÓPTICO FINAL

El diseño final incluye de nuevo el diseño óptico del telescopio (T22 o T35, según el caso) y el de la cámara, modelizado éste en las condiciones de trabajo criogénicas, ya que las características ópticas y mecánicas de los materiales varían con la temperatura. Todos los detalles del diseño se pueden hallar en el documento de FDR (Cárdenas Vázquez, Fernández, Fried, & Rodríguez Gómez, 2008) disponible en la página web de PANIC (PANIC Panoramic Near-Infrared Camera). Para completitud de esta memoria de tesis y poder seguir la evolución del diseño desde esta fase hasta el diseño construido e implementado en el instrumento operativo, también se ha considerado interesante presentar detalles del diseño óptico en el apéndice C, en particular, el diseño óptico final se puede encontrar en la sección C.2.

Se resumen a continuación los resultados del diseño óptico final de PANIC presentado en FDR:

- Es una cámara que se acopla al foco RC del T22 y al del T35, para así tener opción de dos escalas de píxel, la nominal 0.45 arcsec/px en el T22 y otra con el doble de resolución espacial al trabajar en el T35.
- Para la adaptación de PANIC al T35 no es necesario ningún elemento óptico adicional.

Existe un adaptador de interfaz opto-mecánica entre el T35 y el T22 disponible en CAHA para todos los instrumentos que lo necesiten. Este adaptador (Imagen 4-10) asegura la conservación de la posición del plano focal entre el T22 y el T35, permitiendo así que instrumentos diseñados para el T22 puedan operar en el T35.

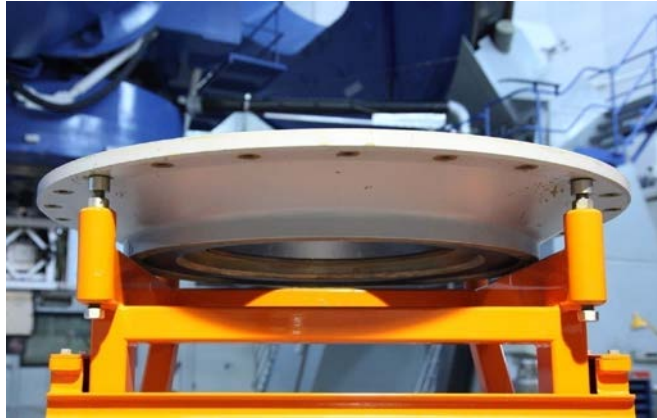


Imagen 4-10: Adaptador mecánico del T35 para interfaz opto-mecánica que permite a instrumentos del T22 operar en el T35.

- Sigue consistiendo en un único tren óptico refractivo, con todas sus superficies esféricas y con tres espejos planos para doblar el camino óptico y empaquetamiento del instrumento (Imagen 4-11).

- Sigue comenzando antes del plano focal del telescopio haciendo así posible la instalación del diafragma de campo frío (Imagen 4-11).

- Sigue reimaginando el cielo en el detector con una relación focal de $F/3.74$, para una escala de placa de 0.45 arcsec/px que proporciona un campo de visión de 31.9 arcmin de lado, cuando opera en el T22. Y además, en operación en el T35 tiene una relación focal de 4.68 , una escala de placa de 0.23 arcsec/px y un campo de visión de 15.9 arcmin de lado (ver Tabla 4–10).

- De nuevo, produce una pupila interna entre las lentes $L5$ y $L6$, que es físicamente accesible para la instalación del diafragma de apertura frío requerido para la consecuente reducción del fondo térmico en la banda **K** (Imagen 4-11).

La apertura y localización de dicho diafragma se optimiza para cada telescopio. Una rueda de diafragmas estará localizada entre los barriles que alojan a las lentes y permitirá el intercambio de diafragmas al trabajar entre ambos telescopios.

El esquema óptico del diseño final se muestra en la siguiente Imagen 4-11.

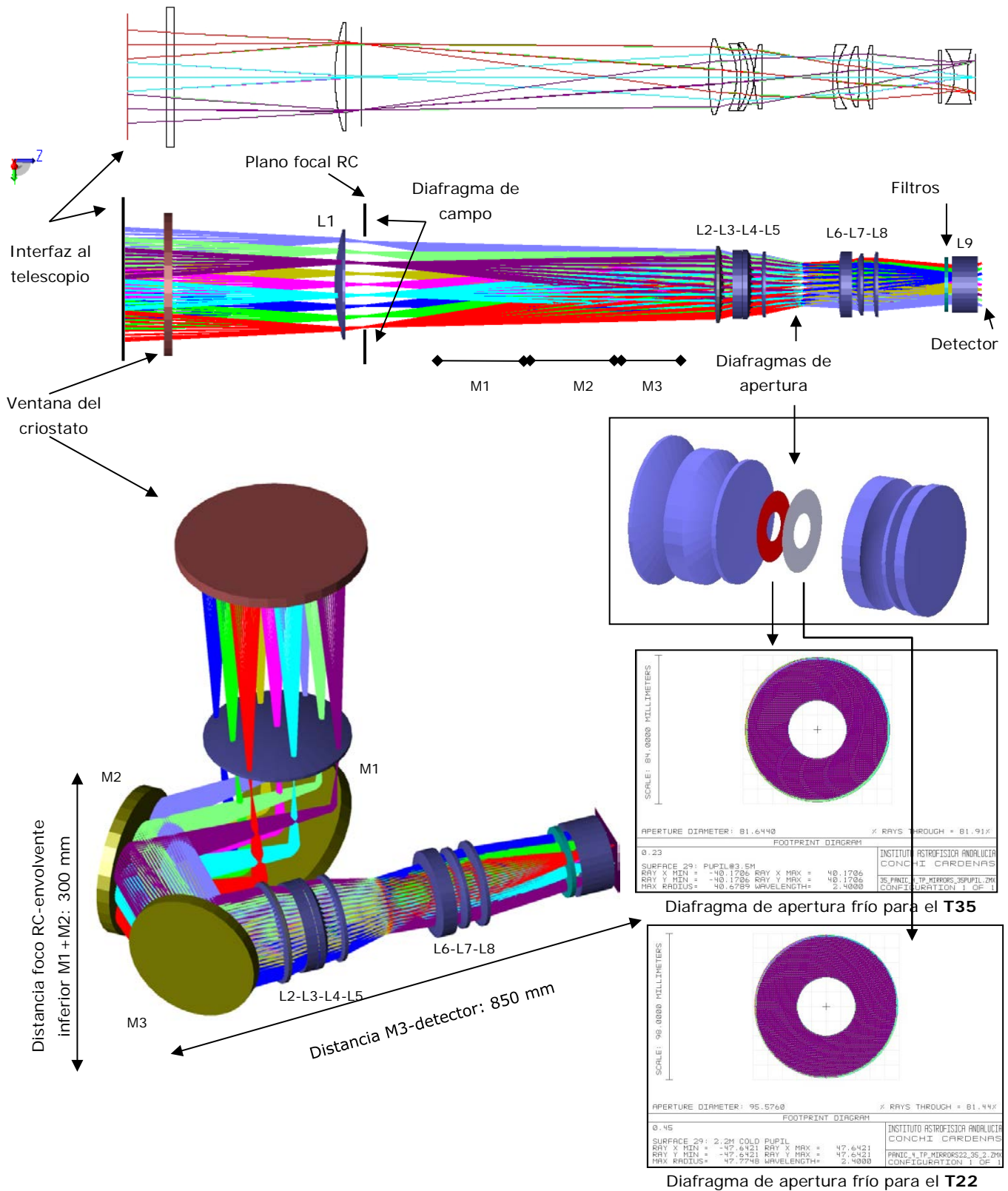


Imagen 4-11: Esquema óptico del diseño final de PANIC.

- Los materiales para las lentes (Sánchez-Blanco & Cárdenas Vázquez, Glass catalogue, 2008, May) se han iterado con el fabricante, reduciendo el número de materiales a cuatro (BaF_2 , CaF_2 , Infrasil y S-FTM16) y optimizado su grosor para maximizar la transmitancia y reducir riesgos de fabricación en particular la realización de los chaflanes (Tabla C-6).

- Implementa un reimaginador de pupila, para ambos telescopios, mediante una lente de Seleniuro de Zinc (ZnSe), localizada en la posición de los filtros, que funciona en combinación con el resto del tren óptico de la cámara (Tabla C-6).

La lente reimaginadora de la pupila (PIL, en inglés *Pupil Imaging Lens*), hace imagen del diafragma de apertura frío interno sobre el detector de PANIC. Dado que dicho diafragma está conjugado con la pupila de entrada del sistema, el espejo primario del telescopio, en el detector se obtiene la imagen simultánea de ambos, espejo primario y diafragma de apertura frío. Por tanto, esta lente es una herramienta que permite medir el alineamiento entre el diafragma de apertura de PANIC y el espejo primario del telescopio, como se explica en detalle en la sección 5.3.

- Los diámetros físicos de los elementos ópticos, sobredimensionados tras la iteración con los ingenieros mecánicos por los chaflanes, con los fabricantes por los chaflanes y por la especificación de superficie óptica pulida, y por último, teniendo en cuenta el análisis detallado de luz difusa, quedan en los siguientes rangos: el diámetro de las lentes se encuentra en el rango entre 180 a 130 mm, la primera lente de campo 255 mm, y la ventana del criostato 330 mm (Tabla C-10).

- Los filtros se encuentran en haz convergente, delante del detector y antes de la última lente, para minimizar los efectos de la variación del ángulo de incidencia sobre los mismos debido a que la dependencia con el campo es mínima en esta posición.

Para la especificación de los filtros interferenciales de PANIC, se han de tener en cuenta dos aspectos esenciales para el correcto funcionamiento del filtro.

En primer lugar, la influencia del ángulo de incidencia sobre el filtro en su banda de paso. Al encontrarse los filtros en haz convergente la variación del ángulo de incidencia sobre los mismos a lo largo de todo el campo de visión produce un ensanchamiento de su paso de banda, una pequeña disminución de su transmitancia y un desplazamiento hacia longitudes de onda más cortas. Para los filtros anchos estos efectos son despreciables pero para los filtros estrechos se ha de tener en cuenta el ángulo medio de operación del filtro para la especificación del mismo. Para minimizar estos efectos en todos los filtros se introducen en la posición delante del detector, justo antes de la última lente, y se acota el valor máximo de dicho ángulo ha de ser menor a 10° en la optimización del sistema óptico.

En segundo lugar, el efecto de la temperatura de operación, pues el paso de banda del filtro sufre un desplazamiento en la misma dirección que la temperatura, así al pasar de temperatura ambiente a criogenia la banda pasante del filtro se desplazará hacia longitudes de onda más cortas.

Durante las iteraciones con el fabricante de estos filtros, y evaluados estos efectos en el caso concreto del diseño de FDR se realiza una especificación detallada de los filtros (Sánchez-Blanco & Cárdenas Vázquez, Filters Specification, 2008, July) de PANIC, que se presenta junto con la documentación de FDR, mediante la cual se asegura que todos los

filtros no sufran un desplazamiento de su longitud central mayor al 0.3% requerido. Especificación más en detalle también la exponemos más adelante en la sección 5.1.3.

- Se lleva a cabo un análisis de luz difusa y de fantasmas (Sánchez-Blanco, Cárdenas Vázquez, & Rodríguez Gómez, Ghost and Stray Light analysis, 2008, February) detallado del sistema que define la estrategia a seguir en PANIC para minimizar la luz difusa:

- a) Se implementan los dos diafragmas naturales en todo sistema óptico, en este casos fríos, el diafragma de campo (común en ambos telescopios y localizado en el foco RC del telescopio, justo detrás de la lente de campo L1) y el diafragma de apertura, que ha sido optimizado para cada telescopio, tanto en diámetro como en posición.
- b) Todas las lentes se han sobredimensionado y luego bafleado con la montura para evitar la luz difusa proveniente de sus bordes y en particular de los chaflanes.
- c) Entre las conexiones entre módulos opto-mecánicos ha de haber un laberinto mecánico que prevenga de la entrada de luz parásita dentro del camino óptico.
- d) El análisis profundo de luz difusa y fantasmas impone los siguientes bafles que han de ser implementados a lo largo del camino óptico: detrás de la ventana de entrada y L1, entre L1 y L2 que incluye a los tres espejos de doblado, a la entrada de L8 y a la salida de L9.
- e) Los espejos de doblado son recubiertos de oro sobre sustrato de vidrio (en lugar de metal) para reducir la luz dispersada.
- f) Todas las superficies ópticas han de ser fabricadas por técnica de pulido manual, evitando el mecanizado por diamante (por ej. las superficies esféricas serían producidas mediante esa técnica). El pulido manual tradicional minimiza la micro-rugosidad de la superficie y por tanto la contribución a la luz difusa total.
- g) Todas las partes mecánicas de aluminio que son visibles directamente en el camino óptico son ennegrecidas mediante anodizado negro.

- El presupuesto de errores incluye los errores de fabricación iterados con los fabricantes, y las tolerancias de montaje iteradas con los mecánicos.

- Para relajar los componentes más críticos, tanto en fabricación como ajuste, se propone una estrategia de ajuste mediante compensadores, de separación entre lentes, y de descentrado. En total cuatro compensadores que son: un compensador de separación y uno de descentrado, tanto en el primer barril como en el segundo barril de lentes.

- El plan específico de ensamblaje, montaje y verificación del sistema a nivel óptico establece el control sobre los compensadores y su ajuste, así como las pruebas ópticas de ingeniería finales.

- Planos de fabricación de cada componente óptico (Cárdenas Vázquez M. C., FDR Optical elements drawing set: Entrance window, L1 to L9, Pupil Imager Lens and Folding mirrors., 2008) que incluyen todas las especificaciones necesarias para fabricación e incorporan las impuestas tanto por el análisis de errores del sistema como las impuestas por el montaje opto-mecánico.

- Verificación de que el diseño cumple todos los requerimientos (incluso de calidad de imagen en la banda fotométrica **Z**) y es completamente viable, tanto desde el punto de vista ingenieril (fabricación de sus componentes e integración y alineado del sistema),

como económico (el trabajo y coste necesarios para su implementación quedan dentro del presupuesto del proyecto).

El sistema óptico es diseñado en las condiciones de trabajo para analizar su correcto cumplimiento de los rendimientos ópticos requeridos, obteniéndose así los radios de curvatura de los componentes ópticos, sus grosores y diámetros, y los espacios de separación entre ellos. Sin embargo, para la fabricación y ensamblaje del sistema es necesario también calcular los parámetros de las lentes y las distancias a la temperatura ambiente, en este caso de 20 °C. Para ello se tiene en cuenta, no solo los coeficientes de expansión de los materiales ópticos (entre 80 K y 293 K), sino también el del material de separación entre ellas, en este caso Aluminio (Al 5083-T6). Más detalles se pueden encontrar en el apéndice C, en la sección C.2 correspondiente al diseño óptico final.

Las ligaduras impuestas ahora incluyen aquellas debidas al detalle del montaje optomecánico de los elementos ópticos y los detalles de su fabricación.

Con respecto al diseño adoptado para la montura de las lentes (recordar la sección 3.5), impone a las lentes el tener unos chaflanes a 40° con una longitud mínima de 4 mm y una terminación de pulido óptico para permitir que la lente se deslice sobre la superficie cónica de la montura sin apenas fricción. En este momento de desarrollo del diseño mecánico, además se requería que la parte cilíndrica del borde de la lente debía tener al menos 1.5 mm. Esto implica que el grosor en el borde debía ser de un mínimo de 6.5 mm.

Con respecto a la iteración con los fabricantes, el punto crítico son las lentes. Demostrar su viabilidad con respecto a los chaflanes es crucial para el desarrollo del instrumento. Tras contactar con varios potenciales fabricantes tan solo la compañía *Société Européenne de Systèmes Optiques* (SESO, en la actualidad "*Thales SESO SAS*") contestó con una propuesta realizable, y con éste la doctoranda hizo todas las iteraciones técnicas necesarias para llevar las lentes a fabricación, disminuyendo así los riesgos de fabricación y costes.

Los cambios más importantes son: se ajustan el mayor número de radios de curvatura a las superficies maestras del fabricante, algunas superficies con un muy alto radio de curvatura se hacen planas y se imponen un espesor mínimo para las lentes fabricadas en S-FTM16. Así el diseño final del sistema de lentes tiene quince radios de curvatura y tres superficies planas, y se consiguen adaptar doce a las maestras del fabricante (en azul en Tabla C-10), quedando tan solo tres fabricados *ad hoc* para PANIC (en naranja en la misma tabla).

También se imponen ligaduras debido a las diferentes interfaces y las condiciones de operación del instrumento. Todas estas ligaduras, que son especificaciones de detalle, son usadas durante el diseño óptico que han de trasladarse a las condiciones de trabajo en criogenia, con las correspondientes iteraciones entre frío y caliente para su correcta implementación.

- La ventana del criostato se ha sobredimensionado por razones mecánicas hasta un diámetro de 330 mm, con el mismo grosor, 20 mm y material, Infrasil 302 que tenía en PDR.
- Las distancias entre los espejos se han fijado de tal forma que se dobla el camino óptico sin viñeteo.

- La distancia entre la interfaz del detector y la lente de campo L9 cumple el requerimiento mecánico de ser mayor a 10 mm, incluso en el borde de la lente.

- Existe un espacio entre todas las lentes, de al menos 1 mm en sus condiciones de trabajo según requerido por la parte mecánica. Este espacio necesario para la contracción-dilatación se ha asegurado que exista tanto en el centro como en el borde de las distintas lentes.

- El compromiso en el grosor de las lentes para maximizar la transmitancia del sistema en particular en la banda **K**, y minimizar el peso de los componentes ópticos, pero a la vez engrosar hasta lo requerido por el fabricante para disminuir riesgos de fabricación.

- A su vez los fabricantes de vidrios imponen condiciones sobre el diseño mecánico y térmico como es el caso de la rampa de calentamiento y de enfriamiento máxima a la que pueden ser sometidas las lentes ha de ser de 0.2 K/min. Esto habrá de ser tenido en cuenta en el diseño mecánico del sistema y tiene repercusión directa en la fase AIV.

- La localización de la rueda de pupilas. El requerimiento de que PANIC opere en el T35, implica el implementar un diafragma de apertura frío optimizado para este telescopio. La localización de la pupila interna se encuentra entre las lentes L5 y L6 en el caso de ambos telescopios, pero en diferente posición y de distinto tamaño (Imagen 4-11), por lo que con la iteración con los ingenieros mecánicos, se resuelve instalar una rueda de pupilas entre estas lentes que permite el intercambio de diafragmas de apertura al trabajar entre ambos telescopios. En la optimización del diseño óptico se tuvo que tener en cuenta dejar el espacio suficiente para dicha rueda.

- La implementación de la PIL se realiza en la rueda de filtros.

La decisión viene dada por dos requerimientos. Primero, la necesidad de que dicha lente ha de reimaginar el diafragma de apertura, situado entre L5 y L6, en el detector. Con lo que la localización de la PIL entre las lentes L8 y L9 es idónea, al estar por detrás del diafragma de apertura, y, además permite utilizar toda la óptica del camino óptico principal junto con la PIL, pudiendo así hacer la reimaginación con la ayuda de tan solo una lente extra. Segundo, dicha PIL ha de poder ser insertada en el camino óptico en el modo de observación/alineado de las pupilas del sistema junto con el filtro **K_S**. Por lo que la introducción como un elemento más de la rueda de filtros cumple perfectamente esta función.

- Espacio para cuatro ruedas de filtros. Consecuentemente, en la optimización del diseño óptico, y en iteración con la mecánica, se impuso esta ligadura y se dejó el espacio necesario entre L8 y L9.

En este estado del proyecto se establece que el número de ruedas de filtros será cuatro de 6 posiciones cada una. Esta decisión se toma por conjunción entre los requerimientos científicos del número de filtros astronómicos a implementar, las herramientas necesarias para observación (posiciones cerradas y abiertas), el modo de ingeniería de la reimaginación de la pupila, la iteración con la mecánica y la previsión de dejar posiciones disponibles para filtros futuros.

De las 24 posiciones disponibles en las ruedas de filtros se prevé la siguiente distribución: 7 filtros, 4 abiertas, 4 cerradas y 1 PIL. Lo que dejaría disponibles 8 posiciones para futuros filtros.

En la Imagen 4-12 se muestra el diseño mecánico final que implementa las ruedas mencionadas.

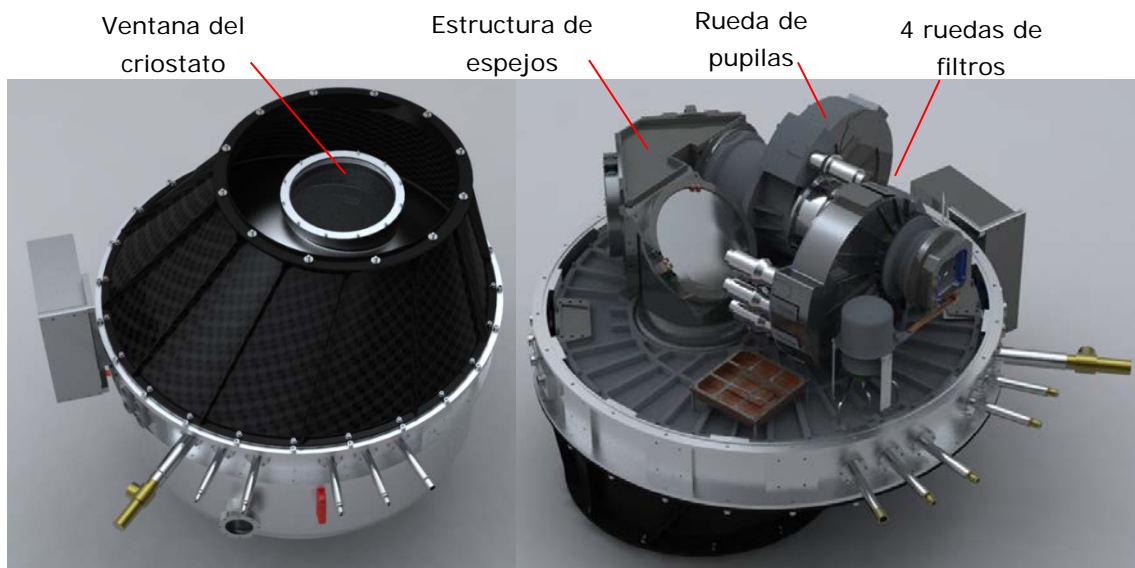


Imagen 4-12: Diseño mecánico y criogénico final. Izqda.: vista superior del instrumento cerrado y en su posición de acople al telescopio. Dcha.: vista inferior del banco óptico del instrumento abierto.

El presupuesto final de errores (Cárdenas Vázquez, Sánchez-Blanco, & Rodríguez Gómez, Complete Image Quality Error Budget, 2008, August) considera todas las posibles fuentes de errores del sistema tanto estáticos como los debidos a operación. Así se consideran: errores del índice de refracción de los vidrios, errores de fabricación de los elementos ópticos, los de integración y ajuste del sistema, errores térmicos y errores de estabilidad de imagen. La contribución de estos errores a la degradación del sistema óptico diseñado se estima mediante una suma cuadrática, que representa un valor muy cercano a la calidad del sistema esperado, y teniendo ésta siempre que cumplir con los requerimientos de calidades ópticas impuestos.

El análisis de tolerancias del sistema se hace en base a la siguiente disposición mecánica presentada en la Imagen 4-13 y en la Imagen 4-14.

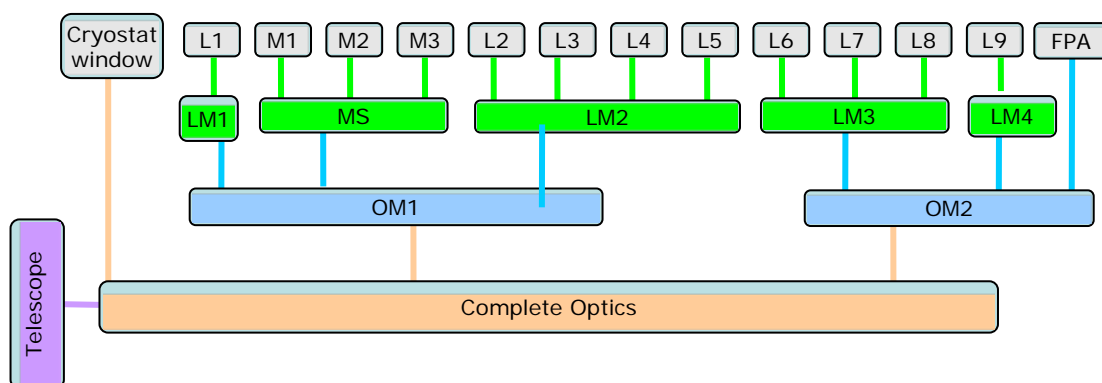


Imagen 4-13: Agrupamiento mecánico del diseño óptico final de PANIC.

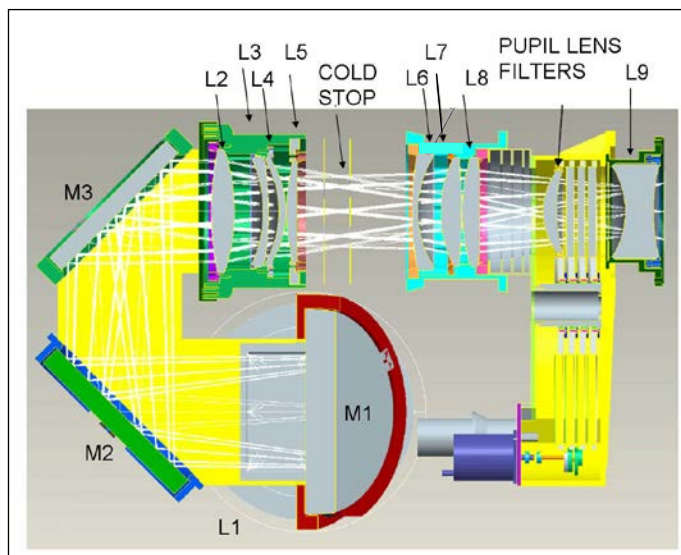


Imagen 4-14: Disposición opto-mecánica del diseño óptico final de PANIC que muestra los subsistemas principales.

El proceso del análisis de tolerancias es un proceso iterativo y sus resultados retroalimentan tanto las especificaciones de detalle de los componentes como el diseño opto-mecánico y el alineado del instrumento. Como ya se ha mencionado los primeros análisis dan resultados muy ajustados para posicionamiento mecánico en descentrado de $20\ \mu\text{m}$, y de hasta $40\ \text{arcsec}$ en inclinación, y que se relajan con la implementación de compensadores mecánicos que son ajustados durante el proceso de AIV según se explica en detalle en la sección 5.2.5.

Con estas consideraciones la calidad óptica del sistema incluyendo todos los errores mencionados se estima será de una sigma $9.36\ \mu\text{m}$ (req. $< 10.04\ \mu\text{m}$) para la operación en el T22 (Tabla 4–4). Los rangos de los compensadores de separación resultan de un valor menor que $\pm 0.2\ \text{mm}$, para la distancia entre L2-L3 y, menor que $\pm 0.1\ \text{mm}$, para la distancia entre L6-L7. Los compensadores de descentrado, tanto en L2 como en L7, menores que $\pm 0.2\ \text{mm}$. Como conclusión los rangos de tolerancias son asequibles y alcanzables. Un análisis similar para PANIC trabajando en el T35 confirma que este modo de operación no introduce restricciones en las tolerancias realizadas para el T22.

Para la fabricación de las lentes y los espejos los valores de las tolerancias que se obtienen son:

Elemento	Radios de curvatura	Espesor	Wedge	Planitud (<i>fringes @ 632.8 nm</i>)	Irregularidad de la superficie (<i>fringes @ 632.8 nm</i>)
Ventana	-	$\pm 100\ \mu\text{m}$	$\pm 1.2\ \text{arcmin}$	1-1	0.5-0.5
Lente L1	$\pm 0.1\%$	$\pm 100\ \mu\text{m}$	$\pm 1.2\ \text{arcmin}$	--1	0.5-0.5
Lentes L2 a L9	$\pm 0.1\%$	$\pm 100\ \mu\text{m}$	$\pm 2.0\ \text{arcmin}$	--	0.5-0.5
PIL	$\pm 0.1\%$	$\pm 100\ \mu\text{m}$	$\pm 3.0\ \text{arcmin}$	--	0.5-0.5
Espejos	-	-	-	1	0.5-0.5
FILTER	-	$\pm 100\ \mu\text{m}$	$\pm 3.0\ \text{arcmin}$	1-1	0.5-0.5

Tabla 4–8: Tolerancias de fabricación para los elementos ópticos individuales.

La tolerancia en *wedge* presentada en la Tabla 4–8 se puede trasladar a error en el borde (diámetro_lente \times *sen wedge*) resultando del orden de 50 μm , una especificación que el fabricante puede producir para estas lentes con chaflanes con una relación coste-fabricación dentro de presupuesto.

Para el posicionado mecánico del sistema y ajuste de los elementos individuales y de los distintos subsistemas se obtienen rangos dentro de estos márgenes:

Elemento	Descentrado X e Y	Posición Z	Ángulo respecto X e Y
Ventana criostato	--	$\pm 100 \mu\text{m}$	$\pm 1.5 \text{ arcmin}$
Lente L1	$\pm 50 \mu\text{m}$	$\pm 100 \mu\text{m}$	$\pm 1.2 \text{ arcmin}$
Espejos	$\pm 100 \mu\text{m}$	$\pm 100 \mu\text{m}$	$\pm 1.5 \text{ arcmin}$
Lentes L2 a L9	$\pm 50 \mu\text{m}$	$\pm 100 \mu\text{m}$	$\pm 1.5 \text{ arcmin}$
Estructura espejos Barriles LM2 y LM3	$\pm 50 \mu\text{m}$	$\pm 100 \mu\text{m}$	$\pm 1.2 \text{ arcmin}$
Subsistemas OM1 y OM2	$\pm 50 \mu\text{m}$	$\pm 100 \mu\text{m}$	$\pm 1.02 \text{ arcmin}$
Filtros	--	$\pm 200 \mu\text{m}$	$\pm 3.0 \text{ arcmin}$
PIL	$\pm 100 \mu\text{m}$	$\pm 200 \mu\text{m}$	$\pm 3.0 \text{ arcmin}$
Detector	$\pm 50 \mu\text{m}$	$\pm 50 \mu\text{m}$	$\pm 1.2 \text{ arcmin}$
Instrumento completo	$\pm 0.5 \text{ mm}$	$\pm 200 \mu\text{m}$	$\pm 4.2 \text{ arcmin}$

Tabla 4–9: Tolerancias de posicionado mecánico para los distintos elementos del sistema completo.

El plan de AIV del sistema a nivel óptico (Sánchez-Blanco, Cárdenas Vázquez, & Rodríguez Gómez, *Optical Assembly, Integration and Verification*, 2008, September) que se propone en esta fase del proyecto está más detallado, si bien sigue dividido en las mismas tres grandes categorías: la fabricación de los elementos ópticos y sus pruebas de aceptación; la integración, ajuste y pruebas de verificación de los distintos subsistemas; y la integración, montaje y pruebas de ingeniería final del sistema completo. Se detallan los procedimientos y equipos necesarios para la dos últimas categorías dado que la integración del instrumento se hace *"in house"* por el equipo ingenieril de PANIC, desde el nivel de subsistema a nivel de sistema, con la dificultad añadida de ser un instrumento criogénico.

La estrategia a seguir para el montaje y ajuste final del sistema hace uso de compensadores mecánicos, verificando a nivel de subsistema los barriles por ajuste interferométrico y el alineado del sistema completo en condiciones criogénicas, ajustando por último el detector en distancia y ángulo.

Todos los requerimientos son alcanzados, y se resumen en la Tabla 4–10.

Parámetro	Requerimiento	PANIC
Telescopios de operación	T22 y T35	✓
Estación focal	Foco RC	✓
Modo de operación	Imagen, en todo el FoV	✓
Pupila de entrada	Espejo primario del telescopio	✓
Diámetro de la Pupila de entrada	Diámetro espejo primario del telescopio	✓

Parámetro	Requerimiento	PANIC
Rango espectral	(0.8 – 2.42) μm	✓
Sistema	Contenido en criostato	✓
Temperatura (nitrógeno líquido)	~ 80 K	✓
Presión	10^{-6} mbar	✓
Mecanismo de enfoque	Espejo secundario del telescopio	✓
Tipo de sistema óptico	Refractivo	✓
Tipo de superficies	Esféricas y planos Minimizar número de esféricas y cónicas	Esféricas y planos ✓
Elementos	2 barriles para reimaginación pupila 2 aplanadores de campo	✓
Geometría de las lentes	Implementación de chaflanes en el borde Grosor borde min. 6.5 mm	✓
Filtros anchos	Z, Y, J, H y K_s	✓
Filtros estrechos	FWHM/ λ_c 100 ~ 1%	✓
Filtros estrechos:	desplazamiento permitido en su $\lambda_c \leq 0.3$ %	✓
Imagen de la pupila de entrada	Disponible para introducir un diafragma de apertura en frío dentro del tren óptico	✓
Calidad de imagen de la pupila reimaginada	Pérdida de flujo en la banda K: < 10%	< 2% ✓
Diafragma de apertura	Frío	✓
Degradación del diámetro la pupila fría	≤ 3 % en la banda K	✓
Diafragma de campo	Frío	✓
Reducción de luz difusa	Optimizado para la banda K	✓
Fantasma: intensidad relativa	$< 10^{-4}$	✓
Fantasma: tamaño en el detector	> 10 arcsec (si la intensidad relativa no se cumple)	✓
Distancia focal trasera	> 10 mm	✓
Longitud desde el plano focal	≤ 110 cm	✓
Peso	≤ 400 kg	385 kg ✓
Transmisión	> 45 % en todo el rango espectral	~ 50.6 % ✓
Distorsión máx. (esquina)	≤ 1.5 % para todas las bandas espectrales	< 1.42 % ✓
Magnificación lateral	0.4685 ± 0.0025	0.468 ± 0.003 ✓
T22		
Parámetro	Requerimiento	PANIC
Longitud focal efectiva	(8250 ± 30) mm	(8255 ± 30) mm ✓
Relación focal F#	3.750 ± 0.007	3.746 ± 0.014 ✓
Escala de placa	(0.450 ± 0.007) arcsec/px	(0.445 ± 0.003) arcsec/px ✓
FoV, lado	(32.0 ± 1.0) arcmin	(31.6 ± 0.3) arcmin ✓
Calidad de Imagen D_{EE80}	≤ 2 px = $36 \mu\text{m}$ = 0.900 arcsec	≤ 1.5 px = $26.4 \mu\text{m}$ = 0.65 arcsec ✓
T35		
Parámetro	Requerimiento	PANIC
Longitud focal efectiva	(16400 ± 50) mm	(16390 ± 50) mm ✓
Relación focal F#	4.685 ± 0.008	4.678 ± 0.015 ✓
Escala de placa	(0.226 ± 0.004) arcsec/px	(0.224 ± 0.002) arcsec/px ✓
FoV	(16.1 ± 0.5) arcmin	(15.88 ± 0.11) arcmin ✓
Calidad de Imagen D_{EE80}	≤ 3 px = $54 \mu\text{m}$ = 0.678 arcsec	≤ 2.0 px = $35.5 \mu\text{m}$ = 0.45 arcsec ✓

Tabla 4–10: Lista de especificaciones y su verificación para ambas escalas de píxel de PANIC correspondientes al diseño óptico final.

4.3.2. REVISIÓN DE FDR DE ÓPTICA E INFORME DEL PANEL DE REVISORES.

De nuevo esta etapa finaliza con una revisión de diseño, en este caso final, y en el área de ingeniería óptica, que tiene lugar en Granada en septiembre de 2008. El panel tres de expertos de renombre en el campo y externos al proyecto estuvo formado por:

- Eli Atad (*United Kingdom Astronomy Technology Centre*)
- Peter Bizenberger (MPIA)
- Carlo Baffa (*Arcetri Observatory*)

El diseño óptico final es aprobado, según el informe (Atad, Bizenberger, & Baffa, 2008) favorable emitido en octubre de 2008 por el panel de revisores en base a la revisión de la documentación previamente enviada y a la defensa del diseño que la doctoranda realiza durante la revisión de FDR de la óptica de PANIC.

Se aprueba el diseño óptico final con los siguientes comentarios y recomendaciones de los revisores con repercusión en el diseño óptico:

- El diseño óptico final es bueno y contiene un buen trabajo de modelización y una documentación sólida. Las prestaciones ópticas son razonables y no necesitan mejorarse. El análisis de tolerancias es completo y de confianza.
- Recomienda continuar con la decisión del montaje opto-mecánico propuesto para las lentes, que implican los chaflanes en las mismas, para no retrasar el proyecto con investigaciones de otras soluciones de montaje opto-mecánico.
- Se recomienda, para la mecánica, implementar un ajuste de alineado del instrumento al telescopio en la interfaz de PANIC al telescopio.
- Se recomienda hacer un análisis más profundo sobre el efecto de las aristas de los chaflanes en la luz difusa.

El paso exitoso de esta fase de diseño posibilita el comienzo inmediato de las siguientes etapas del proyecto y, en particular, permite pasar a la etapa de fabricación de los componentes ópticos y a la preparación de las herramientas auxiliares que se usarán durante el AIV del instrumento.

En primer lugar, durante noviembre de 2008, y antes de comenzar la iteración final con los fabricantes para fabricación, se lleva a cabo la recomendación de realizar el análisis más profundo de la contribución de las aristas de los chaflanes a la luz difusa. Dicho análisis confirma que se cumplen los requerimientos respecto de luz difusa e intensidad de los fantasmas, para las dimensiones de las lentes y chaflanes consideradas.

5. IMPLEMENTACIÓN Y VERIFICACIÓN DE PANIC

Este capítulo, continuación del anterior, sigue con el desarrollo del instrumento. En esta fase el instrumento se construye, integra, alinea y verifica en laboratorio, antes y después de su transporte al observatorio, y además, comisionado en el ambos telescopios. En la mayoría de los casos las actividades no son secuenciales, sino que transcurren en paralelo, e incluso hay que volver a atrás en ciertos cálculos o actividades, como por ejemplo cuando fue necesario el cambio de la temperatura de trabajo del instrumento (de 80 K a 95 K) debido a la implementación del diseño criogénico. Sin embargo, para poder seguir el desarrollo de una forma coherente se presenta la explicación desde los elementos individuales hasta la completitud del instrumento. De igual modo que en el capítulo anterior, se puede utilizar la Tabla F-1 del apéndice F para seguir el progreso de las actividades y acontecimientos aquí descritos.

Es de destacar que, debido a la complejidad del instrumento, para llevar a cabo el alineado y verificación de PANIC ha sido necesario diseñar y construir ciertas herramientas auxiliares *ad hoc*. Se describen en la sección 5.1.5. Especial atención se dedica a una de ellas, el Simulador de Estrella (SS, del inglés *Star Simulator*), cuyo diseño detallado se añade también en el apéndice D.

También se usa durante esta etapa del proyecto una serie de equipos de medida y material de laboratorio. En el apéndice E se enumeran los principales equipos de medida y sus características esenciales.

5.1. FASE DE FABRICACIÓN Y ACEPTACIÓN DE LOS DISTINTOS SUBSISTEMAS

El paso satisfactorio del hito del FDR de la Óptica da luz verde a la construcción del instrumento, de forma que se puede proceder a la realización de los distintos contratos para la fabricación de los componentes ópticos.

El objetivo de esta fase es disponer de todos los componentes ópticos del instrumento con la aceptación de fábrica, para pasar a la siguiente fase, la de integración y alineado del instrumento. Veremos que en realidad la fase de AIV (sección 5.2) se va comenzando y realizando simultáneamente a la fabricación, según se va teniendo disposición de las partes que correspondan.

Es adecuado recordar que comienza esta fase de fabricación de los componentes ópticos en paralelo al diseño final del resto del instrumento, que como hemos mencionado tendrá lugar en diciembre de 2009.

Así, la fase de fabricación y aceptación de los componentes ópticos se extiende desde noviembre de 2008 hasta abril de 2012, y comprende las siguientes actividades:

- Interacción final con el equipo mecánico para la definición de fabricación de los chaflanes de las lentes.
- Interacción final con los distintos fabricantes para la fabricación de los componentes ópticos.
- Se realiza un reajuste del diseño orientado a los distintos fabricantes de los componentes ópticos.

- Revisión de las especificaciones de fabricación y su transformación en parámetros cuantificables para los fabricantes.
- Producción de los planos de fabricación de los distintos elementos ópticos, así como la planificación de las pruebas individualizadas de aceptación a realizar en fábrica, y según el elemento, a cumplimentar a su recepción en laboratorio.
- Realización de los contratos con los distintos fabricantes y adquisición de todos los elementos ópticos de PANIC.
- Seguimiento de los distintos contratos, control de la óptica durante fabricación. Evaluación de las no conformidades y su aceptación o rechazo, según el impacto en el diseño.
- Aceptación en fábrica de los distintos elementos en base al informe del cumplimiento de los requerimientos.
- Realizar las pruebas de aceptación en laboratorio de aquellos elementos que, dependiendo del alcance del contrato, requieren de pruebas a la recepción del componente.
- Diseño detallado de los sistemas auxiliares necesarios para las pruebas en laboratorio y su adquisición y montaje.
- Aceptación de todos los componentes ópticos de PANIC y del material auxiliar para las pruebas en laboratorio.
- Realimentación del diseño óptico en fabricación con las medidas de los componentes construidos, en este punto valores reales (no teóricos), de los distintos parámetros ópticos medidos por el fabricante a temperatura ambiente. Así se calculan a la temperatura de trabajo del instrumento y se reajusta el diseño óptico, según se explica en el apéndice C (sección C.4).
- Producir las especificaciones opto-mecánicas para la integración de la óptica, rango de los compensadores y procedimientos de montaje y alineado de detalle.

En la Tabla 5–1 se resumen los principales contratos realizados, y se consigna el coste, sin impuestos, del contrato así como la duración desde que se firma el contrato hasta que se produce la recepción de la mercancía en laboratorio. Todos y cada uno de los elementos ópticos individuales han sido testeados en fábrica y pre aceptados en base al informe de fabricación.

La aceptación final por parte del equipo de ingenieros de PANIC depende del alcance de cada contrato. Así algunos de ellos son aceptados después de realizar pruebas de calidad de superficie y otros por pruebas de supervivencia a ciclado criogénico, según se explica más adelante en esta sección.

Elemento	Fabricante	Contrato	Duración
Validación fabricación chaflanes	SESO	14000 €	Mayo 2009 – Abril 2010
Ventana entrada criostato Lentes L1 a L9	SESO	248000 €	Mayo 2009 – Mayo 2011
Espejos de doblado	<i>Horst W. Kaufmann</i>	13742 €	Mayo 2009 – Febrero 2010
Filtros de ciencia	<i>Materion</i>	125100 €	Mayo 2011 – Febrero 2012
Lente reimaginadora de pupila, PIL	<i>Jenoptik</i>	15200 €	Mayo 2011 – Noviembre 2011

Tabla 5–1: Contratos realizados para la fabricación de los distintos elementos ópticos de PANIC.

Como ya se ha mencionado anteriormente, la información requerida en cada paso del desarrollo del proyecto es diferente, tanto en detalle como en extensión. La sobreespecificación o la subespecificación pueden contribuir considerablemente al coste o la viabilidad del diseño de un sistema. Las especificaciones técnicas tienen significado tanto ingenieril como de negocio. La identificación de las áreas en las cuales las especificaciones pueden ser modificadas en beneficio de todas las partes es muy importante, tanto desde el punto de vista del instrumento, como de las empresas contratadas. Desde el punto de vista contractual, dichas especificaciones detalladas son vinculantes y establecen la responsabilidad cuando se realiza un contrato con una empresa para la adquisición del componente. El cumplimiento de dichas especificaciones en el producto fabricado es parte esencial del diseño y fabricación. Las pruebas de aceptación permiten contrastar las prestaciones de los componentes fabricados con las especificaciones iniciales y de ese modo garantizar un control de calidad final del instrumento.

Estas consideraciones han de tenerse en cuenta tanto en la iteración con los ingenieros mecánicos del equipo de PANIC como con los fabricantes de los diversos componentes ópticos.

5.1.1. LENTES Y VENTANA DE ENTRADA DEL CRIOSTATO

En el caso de PANIC, como ya se ha mencionado en la sección de FDR de la óptica (4.3), tiene prioridad la contratación de la fabricación de las lentes y la ventana de entrada del criostato al ser la que se dilataría más en el tiempo, no solo debido al tamaño de las lentes sino también a la fabricación de los chaflanes.

Este proceso engloba a su vez los siguientes pasos:

- Validación de la herramienta para la fabricación de los chaflanes,
- Adquisición de los diferentes materiales en bruto (cuyo tiempo de producción suele ser de unos cuatro meses o más dependiendo del tamaño necesario),
- Fabricación óptica de cada componente,
- Fabricación mecánica de los chaflanes en cada lente y, por último,
- Aplicar el recubrimiento antirreflejante de ambas superficies ópticas de las lentes y ventana.

Justo tras el paso de FDR de Óptica, entre los meses de noviembre de 2008 a mayo de 2009, la doctoranda trabaja en la definición detallada de todos los componentes ópticos y de los chaflanes. Hasta FDR el grosor mínimo de las lentes en el borde fue de 6.5 mm, que dejaba 1.5 mm de espesor a la parte cilíndrica del borde. Tras la iteración final con el fabricante de las lentes y con el equipo mecánico de PANIC, se requiere que dicha parte cilíndrica ha de tener un mínimo de 3.5 mm para, por un lado, permitir la mecanización de los chaflanes sin riesgo excesivo para la lente, y por otro lado, para el correcto funcionamiento del diseño de la montura opto-mecánica (Imagen 3-4). Como resultado las lentes han de crecerse hasta tener un espesor mínimo en el borde de 8.5 mm.

Así, se reajusta el sistema óptico acorde con el diseño de detalle mecánico y las condiciones y el alcance del contrato de las lentes. Una vez optimizado a la temperatura de trabajo de 80 K, se calculan los valores de todos los parámetros ópticos a temperatura de fabricación, 20 C. El detalle de este cálculo se explica en el apéndice C (sección C.2). En la Tabla C-11 se listan los valores a temperatura ambiente de los componentes ópticos

para su fabricación. Este trabajo se realiza en paralelo al desarrollo del resto del instrumento que está siendo diseñado en detalle para el FDR del instrumento completo (Huber, Baumeister, Rohloff, & Fried, 2009), el cual tiene lugar en diciembre de 2009, un poco más de un año después que el FDR de la óptica, y siete meses después de la firma del contrato de las lentes.

El contrato de las lentes se realiza en mayo de 2009 con la compañía SESO ya mencionada en la sección FDR de la óptica (sección 4.3) y en la Tabla 5–1. La propuesta final acordada incluye dos contratos. Uno primero, para validar la fabricación de los chaflanes, cuyo alcance incluye la verificación de la supervivencia a ciclado térmico de una lente, en particular L2, con chaflán en su montura opto-mecánica real. Los motivos de por qué se eligió L2 se explican un poco más adelante en esta sección.

Y, un segundo contrato para la fabricación de todas las lentes del tren óptico y la ventana de entrada del criostato.

El primer paso para la ejecución de estos contratos, pasa por la validación de la herramienta y del proceso de fabricación de los chaflanes. Las especificaciones detalladas de los chaflanes se encuentran plasmadas en los planos de fabricación de las lentes. En la Imagen 5-4 se muestra el plano de fabricación de L2. En él se puede observar que la longitud requerida en todo el perímetro de la lente es de 4 mm (con una tolerancia de ± 0.5 mm), fabricados a $40^\circ \pm 0.5^\circ$ y una micro-rugosidad de 30 nm rms (es decir, un acabado de pulido de superficie óptica). Además la concentricidad del chaflán del lado del anillo de retención ("*retainer ring*") con una tolerancia de 10 μm , y del lado de la montura de la lente ("*lens mount*") de 5 μm .

SESO fabrica *ad hoc* la herramienta para los chaflanes de las lentes de PANIC y el proceso es validado en febrero de 2010 sobre un vidrio plano-paralelo. En la Imagen 5-1 se presenta parte del informe de los resultados de fabricación de este primer chaflán donde las especificaciones son alcanzadas ("*Compliant*"), siendo los resultados completamente satisfactorios. **C1** y **C2** hacen referencia al chaflán 1, en la primera cara del vidrio, y chaflán 2, en la segunda. Las respectivas longitudes de 9.00 y 14.00 mm establecidas son mayores a las requeridas en PANIC para demostrar que la herramienta produce el chaflán requerido aún en un chaflán mayor.

After using SESO manufacturing process, we measured :
 _ the micro-roughness on both chamfers that is below 9 nm RMS (specification is 30 nm RMS), so **compliant**.

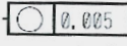
Parameter	Chamfer length (in mm)	Angle (in °)	Circularity (in μm)  The circularity has been measured at 3 different positions along the chamfer.
Specification On all PANIC lens	Nominal ± 0.05 mm Measured at ± 0.05 on retainer ring side ± 0.005 on lens mount side	40 ± 0.5 and identity between the lenses of $\pm 0.03^\circ$	5 for lens mount side 10 for retainer ring side
Measured chamfer C1 (goal length value : 9.00 mm)	9.02 measured at ± 0.005 mm Compliant	39.97 ± 0.01 compared to 39.99 ± 0.01 on the same side of the dummy lens. Compliant	3 : 3 ; 3 Compliant
Measured chamfered C2 (goal length value : 14.00 mm)	13.98 measured at ± 0.005 mm Compliant	40.05 ± 0.01 compared to 40.09 ± 0.01 on the same side of the dummy lens. Compliant	5 ; 2 ; 2 Compliant

Imagen 5-1: Reproducción parcial del informe de resultados del procedimiento de validación para la fabricación de los chaflanes.

Otro punto importante de la fabricación de estas lentes es su supervivencia en sus monturas al llevarlas a las condiciones de operación reales. A este respecto dos aspectos son fundamentales. Uno es estrés mecánico y otro el estrés térmico.

El **estrés mecánico** se produce por la diferencia de coeficiente de dilatación térmica entre la montura de aluminio y el material de la lente, que provoca una contracción diferencial conforme disminuye la temperatura. El tipo de montura adoptada impone la mecanización de los chaflanes en las lentes para disminuir dichas fuerzas durante el enfriamiento de las partes y además mantiene el eje opto-mecánico, localizado en el centro de la lente, invariable entre su posición en caliente y en frío. La calidad y geometría de los chaflanes es esencial para que no se produzcan acumulación de tensiones y la fricción sea mínima durante los desplazamientos diferenciales al cambiar la temperatura. Por parte del equipo de mecánicos de PANIC, ésta es su mayor preocupación, por lo que para validar los chaflanes se negocia con el fabricante de las lentes:

- 1) Por una parte la contratación de una lente, réplica de la lente de mayor riesgo de todas, para someterla a un ciclado criogénico en su montura real.

Se elige la lente del tren óptico de mayor tamaño y que a la vez es de material cristalino, por ser más frágil que un material amorfo y más sensible por tanto a gradientes térmicos y estrés mecánico. Ésta es L2 (Tabla C-10), que tiene un diámetro de 180 mm y es de CaF_2 .

Si la lente de mayor riesgo sobrevive significará que la montura funciona adecuadamente y que lentes de menor tamaño y/o no frágiles también sobrevivirán con éxito.

- 2) Y por otra parte que el alcance del contrato de las todas las lentes incluye la supervivencia a un ciclado criogénico en una montura diseñada *ad hoc* para estas pruebas que asegura el mínimo de estrés mecánico para la lente y una rampa térmica menor de 12 K/h.

La supervivencia de la lente en estas condiciones es responsabilidad de SESO y son realizados por el equipo de PANIC en los laboratorios del MPIA en un criostato de pruebas (incluyendo a la doctoranda).

Por parte del fabricante, acepta que las lentes sean criogenizadas como parte del contrato pero en un tipo de montura que no someta a la lente a estrés mecánico por un lado, y por otro que asegure que la rampa de calentamiento y la de enfriamiento sea menor a 0,2 K/min ($< 12 \text{ K/h}$), para también asegurar que el **estrés térmico** es mínimo. Así la doctoranda en colaboración con el equipo mecánico de PANIC diseñaron y acordaron con SESO la montura en la que serían sometidas cada lente, con solo un punto de contacto en el chaflán y fijadas perimetralmente en tres puntos tipo muelle con una fuerza de 14 N por punto (ver Imagen 5-2). A esta montura nos vamos a referir como "tipo SESO".

Para demostrar que la rampa térmica era la requerida se criogenizó un vidrio de CaF_2 , del que el MPIA disponía de un anterior proyecto y cuyas dimensiones eran similares a la lente L8, en la montura acordada "tipo SESO" fabricada por el MPIA y con sensores de temperatura distribuidos radialmente desde el borde al centro de este testigo. Los resultados mostraron que la rampa máxima que sufre la lente en estas condiciones es de 8 K/h, con lo que dio luz verde a la fabricación de las monturas "tipo SESO" para el resto

de lentes. Estas monturas estaban individualizadas según el tamaño de las diferentes lentes.

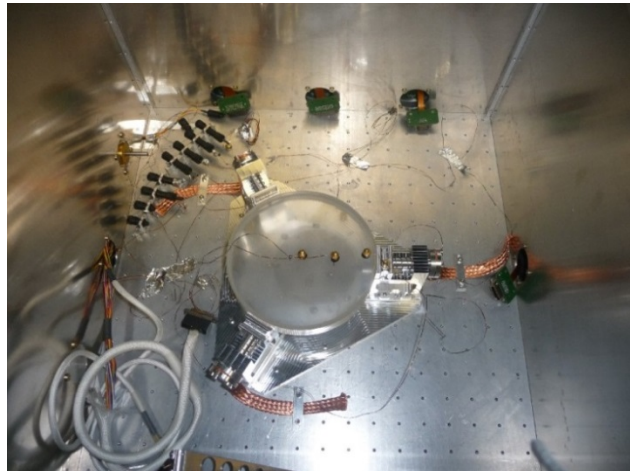
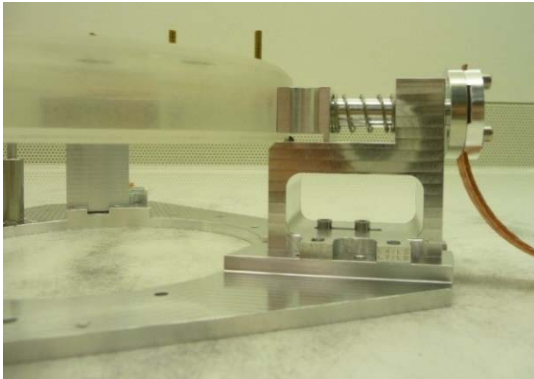


Imagen 5-2: Vidrio de CaF_2 con dimensiones cercanas a L8, en su montura "tipo SESO" para las pruebas de supervivencia a ciclado criogénico. Izqda.: detalle lateral del contacto tipo bola en el chaflán y tipo muelle precargado en el perímetro. Dcha.: Posicionada en el criostato de pruebas dónde se pueden observar la localización de los sensores de temperatura.

De este modo, el primer contrato se realiza sobre una de las lentes con más riesgo del tren óptico, la lente L2, de CaF_2 , material frágil y lente de gran tamaño, con el objetivo de someterla a un ciclado criogénico en el laboratorio del MPIA utilizando la montura opto-mecánica real de PANIC.

Se contrata la fabricación de una réplica mecánica de L2 (según las tolerancias de su plano de fabricación Imagen 5-4 para los chaflanes y su geometría externa), pero sin finalizar las superficies ópticas. Una vez entregada la lente, en abril de 2010, se realiza con éxito dicho ciclado en noviembre del mismo año (ver Imagen 5-3). La rampa máxima, tanto de enfriamiento como en el calentamiento, a la que es sometida la lente es menor de 7 K/h, y la lente sobrevive sin ningún tipo de daño al ciclado. Este hito proporciona la calificación definitiva a la fabricación de los chaflanes de todas las lentes por un lado, y por otro al diseño opto-mecánico de la montura real.

Además se aprovecha el ciclado para ciclar el testigo del recubrimiento a usar en las lentes fabricadas en BaF_2 (izqda. Imagen 5-3: el testigo circular con tonalidad violeta).

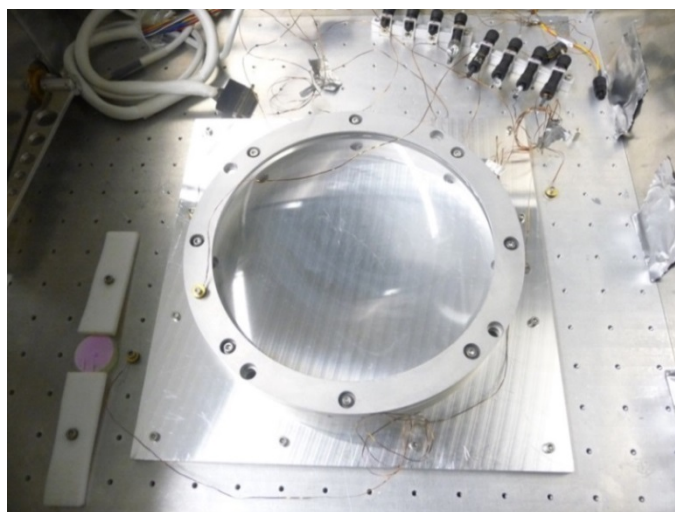


Imagen 5-3: Réplica mecánica de L2 montada en la montura de lentes con chaflanes. A la izquierda: una muestra del recubrimiento para las lentes en BaF_2 .

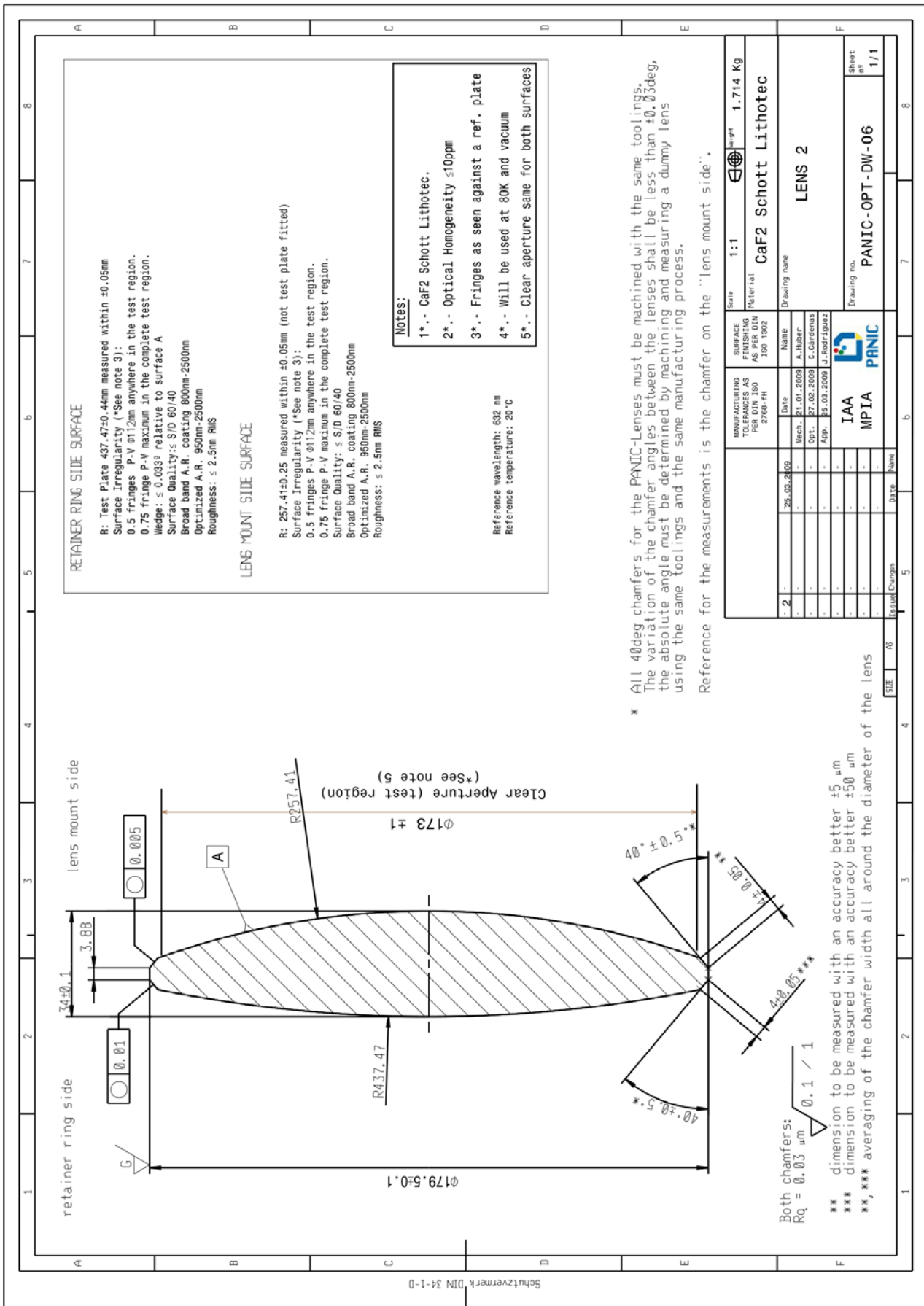


Imagen 5-4: Ejemplo de plano de fabricación de las lentes: L2.

Con respecto al segundo contrato para la fabricación de la ventana del criostato y todas las lentes, resumidamente el proceso de aceptación de estos componentes incluye los siguientes hitos:

- Recepción de los materiales en bruto de cada lente, que tiene un período de producción de cuatro meses mínimo desde el comienzo del contrato.
- Medida del índice de refracción en el rango infrarrojo para material S-FTM16 (especificado para las lentes L3 y L6), en particular para las longitudes de onda: 1.129 μm y 2.325 μm . Este material es el único de todos los materiales del diseño óptico de PANIC cuyo índice de refracción tiene variabilidad dependiendo del lote producido. Para absorber este error, se exigió, como parte del contrato, su medida a la recepción del material y así retroalimentar el modelo óptico.
- Aceptación en fábrica de cada lente en base al informe de fabricación ("*inspection report*"). Éste incluye la evaluación de las "no conformidades", caso de que las haya, para su aceptación o rechazo según el impacto que tengan en el diseño óptico.
- Aceptación en fábrica de los recubrimientos antirreflejantes en base a sus curvas de transmisión.
- Aceptación de la ventana de entrada en base al informe de fabricación.
- Revisión cosmética de cada elemento óptico a la recepción, verificación dimensional y pesado para la verificación del material.
- Ciclados criogénicos de cada lente individual en su montura "tipo SESO" para la supervivencia de la lente y de su recubrimiento antirreflejante.
- Ciclado criogénico de la muestra testigo de los recubrimientos de los distintos materiales: BaF_2 , CaF_2 , Infrasil y S-FTM16.

Durante la fabricación de todos los componentes ópticos, además de las "no conformidades", se van produciendo incidencias y cambios en el desarrollo del contrato que llevan a la modificación del contrato inicial y a la firma de adendas al mismo.

La primera incidencia que nos reporta el fabricante es en noviembre de 2009 sobre la finalización cosmética de las lentes de BaF_2 , L5 y L7. Debido a que este material es muy blando, podrían presentar una calidad cosmética no perfecta, un patrón de rallado casi imperceptible al ojo, a pesar de cumplir su función óptica. Nos plantea que una vez recubierto el material, al aplicar el recubrimiento antirreflejante, se podría producir más cantidad de luz difusa de la esperada. El equipo de PANIC decidió evaluar dicho efecto mediante la medida de la reflectancia difusa de una muestra de BaF_2 sin recubrir y otra recubierta. Los resultados obtenidos estaban dentro del rango permisible para PANIC y se aceptó la finalización cosmética que podían proporcionarnos. Además se cicló la muestra recubierta para verificar la supervivencia del recubrimiento antirreflejante (izqda. en Imagen 5-3).

Con respecto a los cambios realizados en el contrato inicial, la primera adenda se firma en febrero de 2010, debido a que SESO reporta ciertos retrasos en la fabricación de las lentes, por lo que se firma la entrega secuencial de las lentes según se vayan terminando de fabricar, sin tener que esperar a que todas estén finalizadas para disponer de las lentes

en el laboratorio. Así, se entrega primero la ventana de entrada del criostato, que no tiene chaflanes como los de las lentes y que SESO ha fabricado en paralelo al primer contrato. Es entregada a la vez que la réplica de L2, en mayo de 2010. La supervivencia de la ventana de entrada es responsabilidad del equipo de PANIC al ser sus condiciones de supervivencia las de sobrevivir a la diferencia de presión y temperatura, y dicha prueba de supervivencia se realiza directamente en el criostato de PANIC en diciembre de 2010 tan pronto se dispuso de dicho criostato ya completamente operativo y se realizó el primer ciclado del mismo.



Imagen 5-5: Instalación de la ventana de entrada del criostato en PANIC para hacer su ciclado criogénico para la supervivencia de la misma.

En noviembre de 2010 se firma la segunda adenda que contiene las condiciones de realización de las pruebas de supervivencia de las lentes (mencionadas anteriormente en esta sección) acordadas entre SESO y el equipo de PANIC.

Además el primer ciclado de una lente se realiza con presencia del técnico responsable de SESO, para la verificación del proceso y su validación para el resto de las siguientes lentes.

Durante la fabricación de las lentes, SESO nos comunicó que la responsabilidad de dicha supervivencia sólo sería de SESO si las pruebas se hacían en una montura que aseguraran el mínimo de estrés mecánico y una rampa térmica menor de 12 K/h, según se ha explicado anteriormente en esta sección.

Además durante esta fabricación, el fabricante reporta “no conformidades” en algunas de las lentes cuyo impacto en el diseño óptico es evaluado y aceptado o rechazado según sea absorbible o no por parte del equipo de PANIC para mantener intacto el cumplimiento de los requerimientos científicos del instrumento. El detalle de estas “no conformidades” se encuentra explicado en el apéndice C, en la sección C.4, y enfatizadas en rojo en la Tabla C-12 de esa misma sección.

Conforme se van recibiendo las lentes, desde diciembre de 2010 hasta mayo de 2011, se realizan los ciclados criogénicos en paralelo a la fabricación del resto de lentes. Los

cicladados se extienden desde enero a junio de 2011. También se aprovechaban dichos cicladados para ciclar las muestras testigo de los recubrimientos que se hubieran recibido con anterioridad. A modo de ejemplo, se muestra en la Imagen 5-6 e Imagen 5-7), la primera de ellas, L8, y las dos lentes fabricadas en S-FTM16 en la Imagen 5-8.

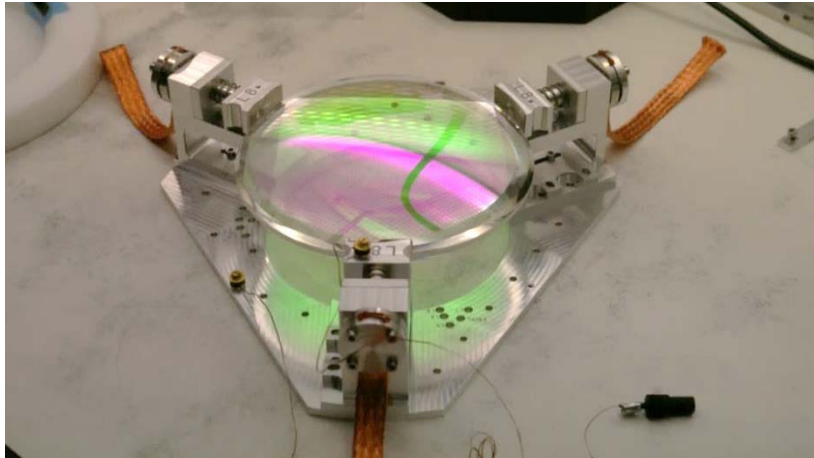


Imagen 5-6: L8 en su montura "tipo SESO" preparada para su ciclado criogénico previa a la aceptación final de la lente.

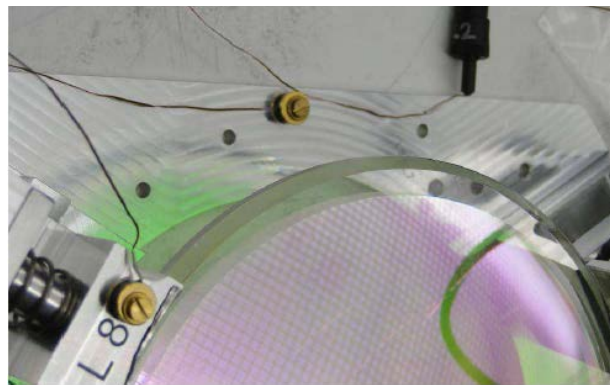
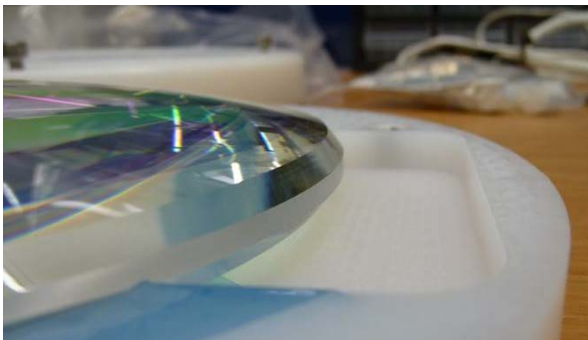


Imagen 5-7: Izqda.: Detalle de los chaflanes de L8 fabricada. Dcha.: Detalle de la localización del sensor de temperatura en la montura "tipo SESO".

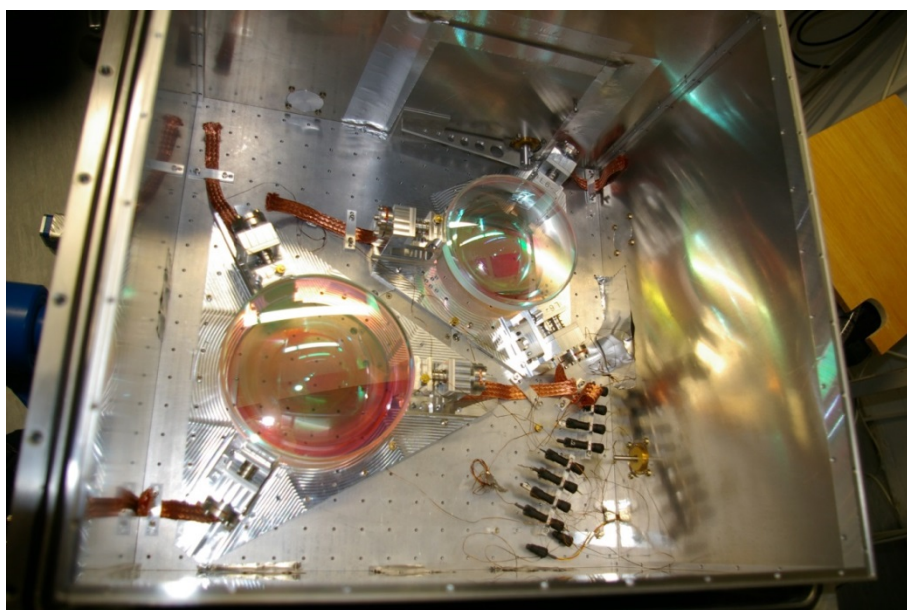


Imagen 5-8: L3 y L6, de S-FTM16, en montura "tipo SESO" después de su ciclado en el criostato de pruebas.

Las dos lentes de BaF₂, L5 y L7, fueron las últimas en ser entregadas en mayo de 2011. El fabricante tuvo problemas en la elaboración de los chaflanes debido a que es un material blando a la vez que cristalino, y se produjeron esquirlas en los bordes de los chaflanes. Nos reportó el problema en enero de 2011. El comportamiento óptico de la lente era correcto, pero su integridad mecánica podía estar comprometida. Por este motivo se renegoció con SESO que la aceptación final de estas dos lentes sería llevada a cabo en las monturas reales, previa supervivencia a ciclado en las monturas "tipo SESO". Hubo que llegar a un compromiso de riesgo para no retrasar el proyecto y se firma así la tercera adenda al contrato en marzo de 2011. Las lentes sobrevivieron exitosamente tanto al ciclado en las monturas tipo SEO como al ciclado en sus monturas reales. Para éste último hubo que esperar a tener fabricadas las monturas reales de las lentes de PANIC, con lo que dicho ciclado tuvo lugar en marzo y abril de 2012.

En resumen, el inicio del contrato con SESO se realiza en mayo de 2009 y se produce la aceptación de todas las lentes (incluyendo la ventana de entrada del criostato), tras haber sido cicladas y habiéndose probado con testigos los recubrimientos más críticos, en abril de 2012.

5.1.2. ESPEJOS DE DOBLADO

El siguiente contrato en prioridad es el de fabricación de los tres espejos de doblado.

En la iteración con mecánicos, con el objetivo de disminuir el peso del instrumento, los espejos de doblado se cambian de circulares a rectangulares. Por otro lado, en la iteración con el fabricante de los mismos se cambia el material a *Zerodur* y se engrosan al valor requerido por el fabricante para las dimensiones mecánicas finales.

Tras varias iteraciones técnicas con SESO y con "*Horst W. Kaufmann Präzisions-Optik*" (en Alemania) el contrato se firma con éste segundo fabricante, ya que a igualdad de cumplimiento de requerimientos el coste era menor. La firma se produce a la vez que los de las lentes, en mayo de 2009. En este contrato se establecen los siguientes hitos:

- Fabricación de los tres espejos y aceptación de la calidad de superficie sin recubrimiento reflejante en fábrica. Recibidos en noviembre de 2009.
- Aceptación de dicha calidad antes de recubrir mediante análisis del interferograma de sus superficies ópticas. Dicha verificación se realiza en el laboratorio del MPIA así como su verificación dimensional en enero de 2010.
- Aceptación del recubrimiento de oro (noviembre de 2009) subcontratado a la empresa *Tafelmaier* y ciclado criogénico de la muestra del recubrimiento de oro (abril de 2010, correspondiente al espejo de muestra que se explica a continuación en la siguiente página).
- Revisión cosmética a la recepción y verificación final de su calidad óptica con recubrimiento mediante interferograma de sus superficies ópticas. De nuevo se realizan en los laboratorios del MPIA a su recepción en febrero de 2010.

El alcance de este contrato incluye la fabricación de los espejos sin recubrir según sus especificaciones en los planos de fabricación (Imagen 5-9) y su posterior recubrimiento con oro. También incluye la validación del recubrimiento en condiciones de criogenia.

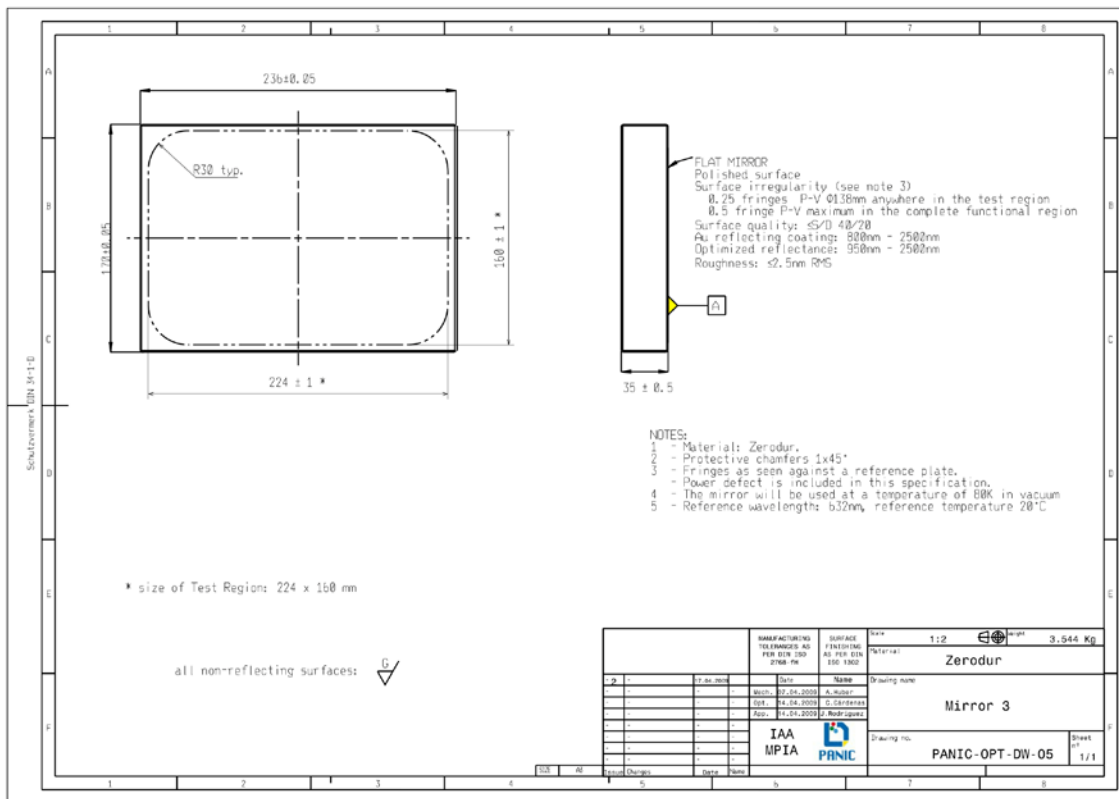


Imagen 5-9: Ejemplo de plano de fabricación de los espejos: Espejo M3.

Sin embargo, es responsabilidad del equipo de PANIC, tanto la supervivencia de los espejos en criogenia así como la influencia de las posibles deformaciones, que puede causar su montura en la calidad óptica final de la superficie.

Por este motivo se toman las siguientes decisiones con respecto a la verificación a nivel de componente para los espejos:

- Adquirir un espejo muestra con requerimientos de superficie y de recubrimiento iguales a los espejos de doblado. Éste espejo de prueba (de diámetro 106 mm y grosor 18 mm) se le compra también a *Kaufman*.
- Usar dicho espejo de prueba para:
 - a) Validar el diseño de la montura de los espejos reales y establecer el procedimiento correcto de su montaje, mediante la realización de interferogramas de su superficie para valorar los efectos de la montura en la deformación de la superficie y su influencia en la calidad óptica (Imagen 5-10).
 - b) Probar la supervivencia del recubrimiento y la supervivencia del propio espejo montado a un ciclado criogénico. En la Imagen 5-11 se muestra este espejo de prueba montado en el prototipo de montura e instalado dentro del criostato de pruebas para someterlo a un ciclado criogénico.

Se realizan estas pruebas en abril de 2010 con resultados completamente satisfactorios.

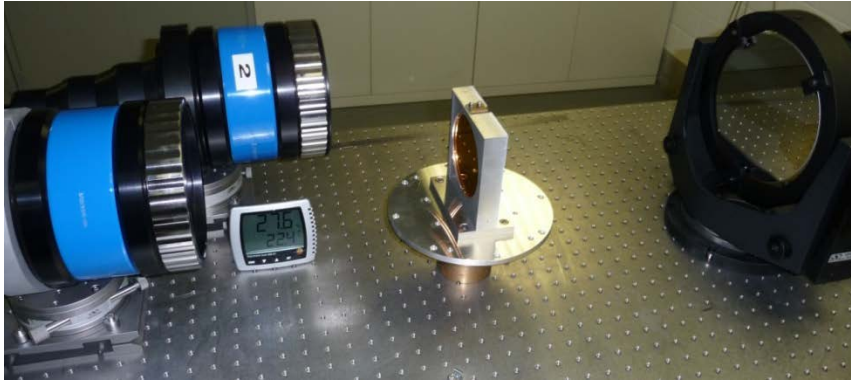


Imagen 5-10: Realizando el interferograma de superficie del espejo de prueba para la influencia de la montura en la calidad de su superficie.

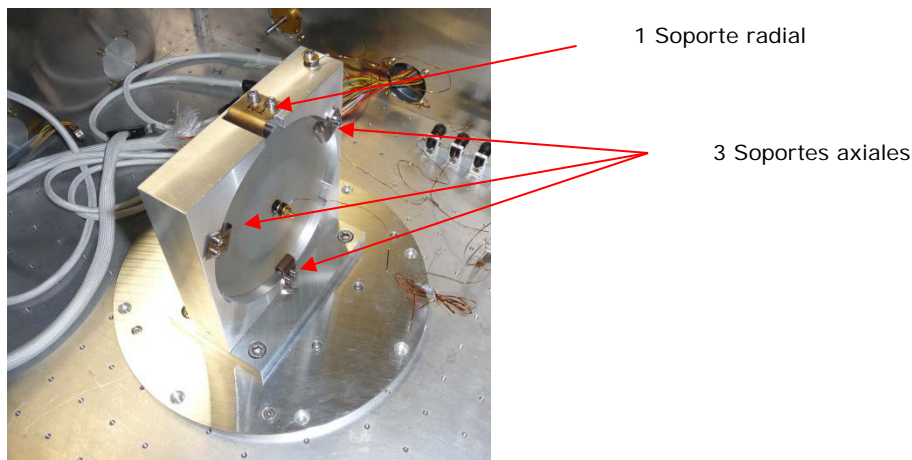


Imagen 5-11: Espejo de prueba en el prototipo de montura e instalado en el criostato de pruebas para su ciclado criogénico.

De las pruebas a), en colaboración con los ingenieros mecánicos, se establece el concepto de montura para los espejos estará basado en muelle precargados a una fuerza igual al doble del peso del correspondiente espejo. Además el espejo presenta aberraciones significativas debido al soporte radial, pero que puede ser despreciable si el montaje del espejo se realiza, primero fijando los soportes axiales y luego fijando el soporte radial. Se establece así el diseño preliminar de las monturas de los espejos y el procedimiento de montaje para minimizar aberraciones. Esto será verificado asimismo en las monturas finales como se explica más adelante en esta sección.

Los espejos fabricados y sin recubrir se aceptan en fábrica en base a los respectivos informes de la calidad de superficie y son recibidos en noviembre de 2009 (Imagen 5-12). La producción de estos espejos no tuvo ninguna incidencia mayor, salvo que el espejo M3 hubo de ser repulido tras el primer análisis.



Imagen 5-12: Espejos de doblado sin recubrimiento a su recepción en noviembre de 2009.

Las pruebas realizadas por la doctoranda a los espejos de doblado fueron:

- 1) Espejos sin recubrir y sin montura: Interferogramas de la superficie óptica de los espejos para verificar la calidad requerida de fabricación.
- 2) Espejos sin recubrir y con una montura preliminar: Interferogramas de la superficie óptica de los espejos para medir el efecto de la montura en la calidad de superficie y así poder, diseñar la montura en detalle con las modificaciones necesarias y establecer el procedimiento de montaje del espejo en la montura.
- 3) Espejos recubiertos y sin montura: Interferogramas de la superficie óptica de los espejos para verificar que el recubrimiento reflejante no afecta a la calidad de la superficie fabricada.
- 4) Espejos recubiertos y con en la montura preliminar: Interferogramas de la superficie óptica de los espejos para medir el error final que los espejos introducirán en el sistema óptico.

Los resultados de todas estas pruebas se resumen en la Tabla 5–2.

Espejo	Calidad de superficie (<i>fringes</i> P-V)					
	Especificación		Construidos			
			Sin recubrimiento		Con recubrimiento	
			Sin montura	Con montura preliminar	Sin montura	Con montura real
M1	En la apertura óptica	≤ 1	0.23	0.31	0.28	0.46
M2	En la apertura óptica	≤ 1	0.38	0.56	0.42	0.45
M3	En la apertura óptica	≤ 0.5	0.32	0.50	0.30	0.39

Tabla 5–2: Medidas de la calidad de superficie de los espejos, antes de ser recubiertos (sin y con montura) y de los espejos recubiertos en su montura.

Así, a la recepción de los espejos sin recubrir, se realiza una inspección visual y se verifican dimensionalmente y, seguidamente, se efectúan las pruebas 1). La Imagen 5-13 muestra el dispositivo experimental para la obtención del interferograma de la superficie de M3 sin recubrir. Las características del interferómetro utilizado se incluyen en el apartado E.3. Los resultados confirman que los espejos fabricados cumplen las especificaciones requeridas de fabricación (Tabla 5-2, columna "sin recubrimiento"_"sin montura").

A continuación, se realizan las pruebas 2). Otro interferograma (Imagen 5-14) de la superficie de los espejos, pero ahora montado, cada espejo, en su correspondiente montura preliminar. Los espejos se montan siguiendo el procedimiento de apriete (primero los tres soportes axiales, después el soporte radial) aprobado con el espejo de prueba. Los resultados demuestran que tanto las monturas como el procedimiento de montaje son adecuados, pues el error introducido sigue estando por debajo de la especificación de fabricación del espejo (Tabla 5-2, columna "sin recubrimiento"_"con montura preliminar"). No obstante, cierto ajuste en la precarga del soporte radial es necesario para los espejos M2 y M3. Se decide hacer el ajuste final en las monturas reales.

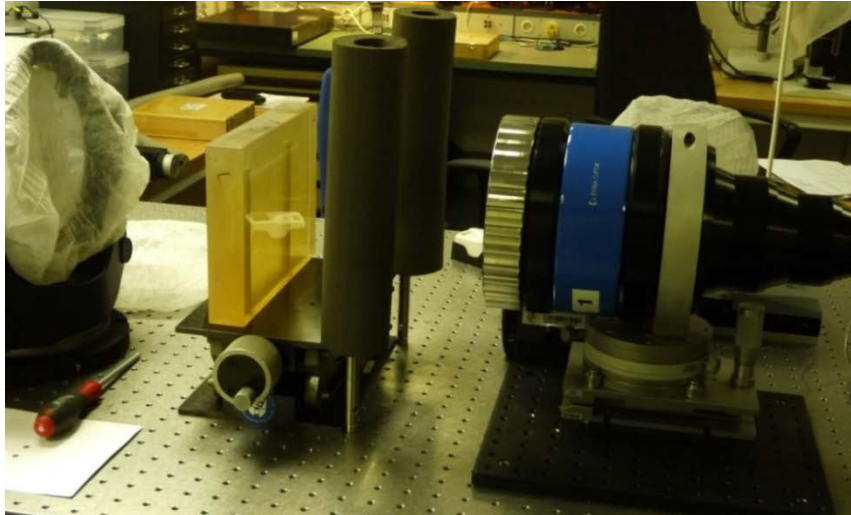


Imagen 5-13: Realizando el interferograma de superficie de M3 sin recubrir.

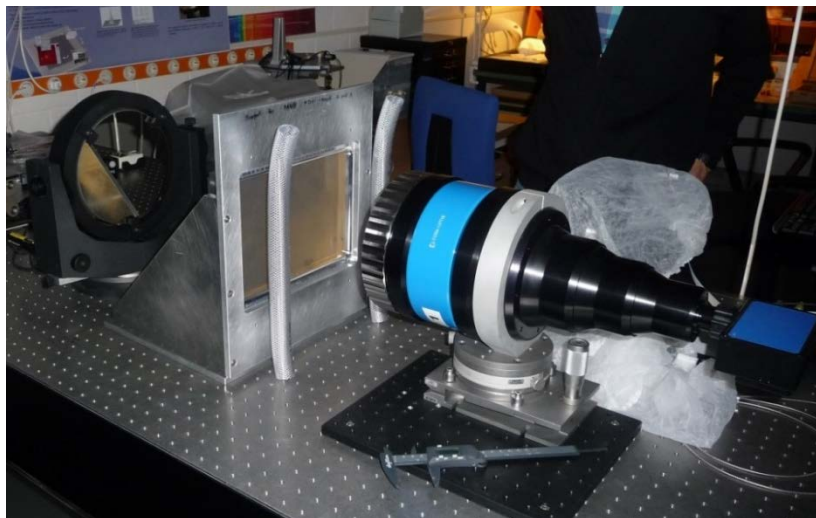


Imagen 5-14: Realizando el interferograma de superficie de M3 incluyendo la influencia de la montura en la medida.

En la Imagen 5-15 se muestra, como ejemplo, el interferograma del área central M2 de diámetro 150 mm, sin montura (izqda.) y con montura (dcha.). Como se aprecia en el valor P-V de ambos interferogramas, el error de la superficie aumenta desde 125.14 nm (0.39 *fringes* P-V) a 177.05 nm (0.56 *fringes* P-V) debido a la influencia de la montura.

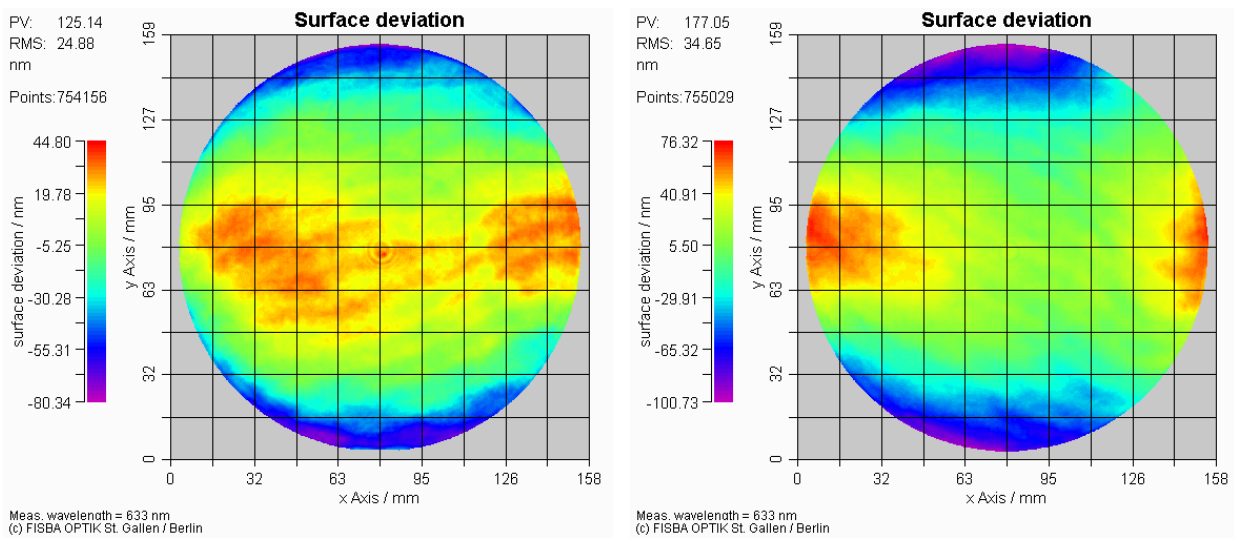


Imagen 5-15: Interferograma de superficie de M2 sin recubrir, sin y con montura preliminar.

La especificación detallada del recubrimiento reflejante para los **espejos de doblado** requería de una transmisión media en el rango espectral de optimización mayor al 97%. El recubrimiento debería ser de oro que posee una alta reflectividad en el rango espectral de PANIC. Además dicho recubrimiento ha de ser protegido con una fina capa que dé durabilidad en el tiempo al recubrimiento de oro y permita su manejo durante el AIV, ya que el oro es muy higroscópico.

El recubrimiento de oro protegido ("*Au protected*") a aplicar en nuestros espejos es negociado directamente con la empresa que realiza este trabajo, *Tafelmaier*. La reflectividad finalmente aceptada en octubre de 2009 se muestra en la Imagen 5-16 (línea roja) presenta mejor prestación que la inicialmente ofrecida, también en la misma imagen (línea azul). Esta propuesta corresponde a las medidas realizadas por la empresa en una muestra de prueba.

Los espejos recubiertos, incluido el espejo de pruebas mencionado anteriormente, son recibidos en febrero de 2010. El fabricante del recubrimiento también proporciona la curva de reflectancia medida del testigo de reflectividad cuyo valor se muestra en la Tabla 5–3 junto con el valor requerido.

Componente	Reflectancia(%)	
	Especificación	Construida
Au protegido	Media (> 97 %)	97.57
	Mínima (>95%)	96.20

Tabla 5–3: Transmitancia de los recubrimientos antirreflejantes ópticos construidos y su especificación para fabricación.

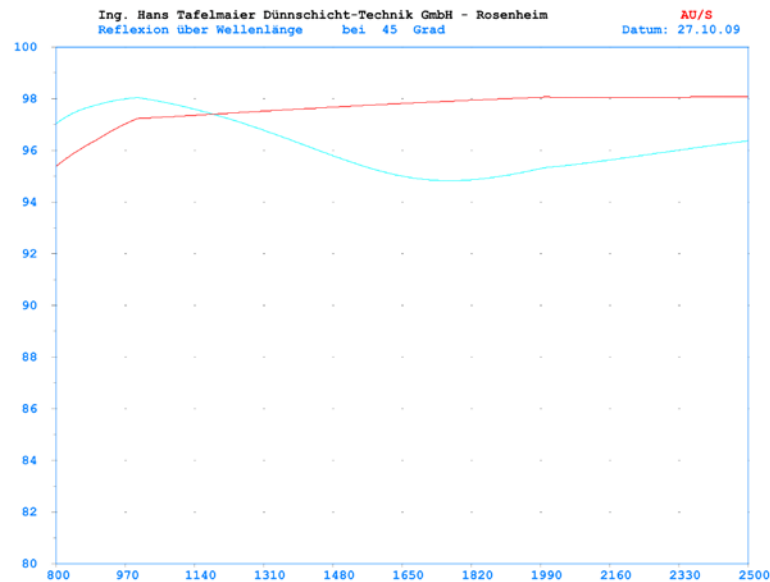


Imagen 5-16: Curva de reflectancia (línea roja) del recubrimiento de oro practicado en los tres espejos de doblado y en el espejo de prueba.

Con la recepción de los espejos recubiertos se da por finalizado el contrato con *Kaufmann*. En los laboratorios del MPIA, la doctoranda procede a la realización de la caracterización de los espejos a nivel de componente. Se realizaron las medidas de calidad de superficie incluyendo los efectos tanto del recubrimiento, pruebas 3), como de la montura, pruebas 4) mencionadas anteriormente.

Los resultados manifiestan como el efecto del recubrimiento en la calidad de superficie de los espejos es despreciable (Tabla 5-2, comparación de la columna "con recubrimiento"_"sin montura" con la columna "sin recubrimiento_sin montura").

Por otro, la columna "con recubrimiento"_"con montura real" (Tabla 5-2) presenta el error total que cada espejo realmente introducirá en el camino óptico, ya teniendo en cuenta ambos efectos, recubrimiento y montura real. Se puede comprobar, por comparación con la columna "con recubrimiento"_"con montura preliminar" cómo las monturas reales se han ajustado para minimizar el efecto que producen en la calidad de superficie.

Como ejemplo se muestra M3 con su montura en la Imagen 5-17 y en la Imagen 5-18 el dispositivo experimental de la medida de la calidad de superficie (similar al del espejos sin recubrir).

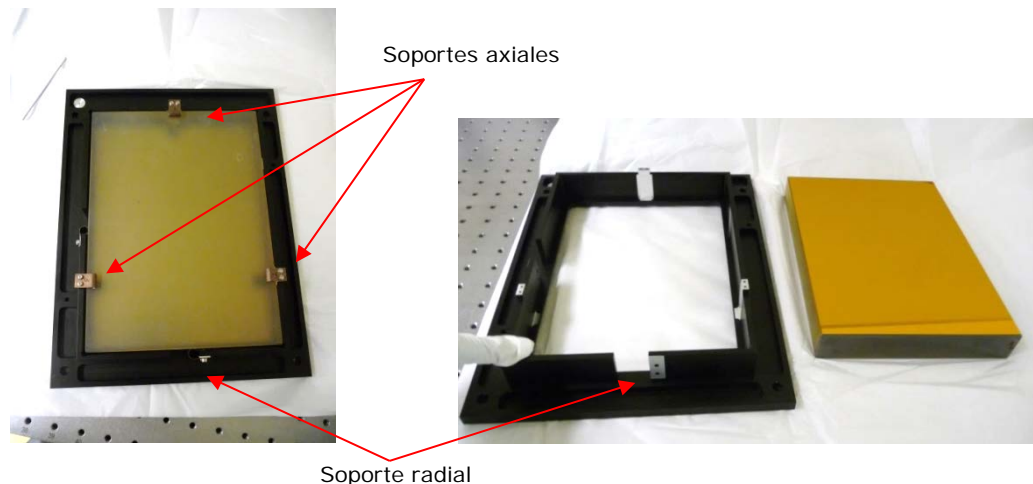


Imagen 5-17: Espejo M3 con el recubrimiento de oro aplicado y su montura real.

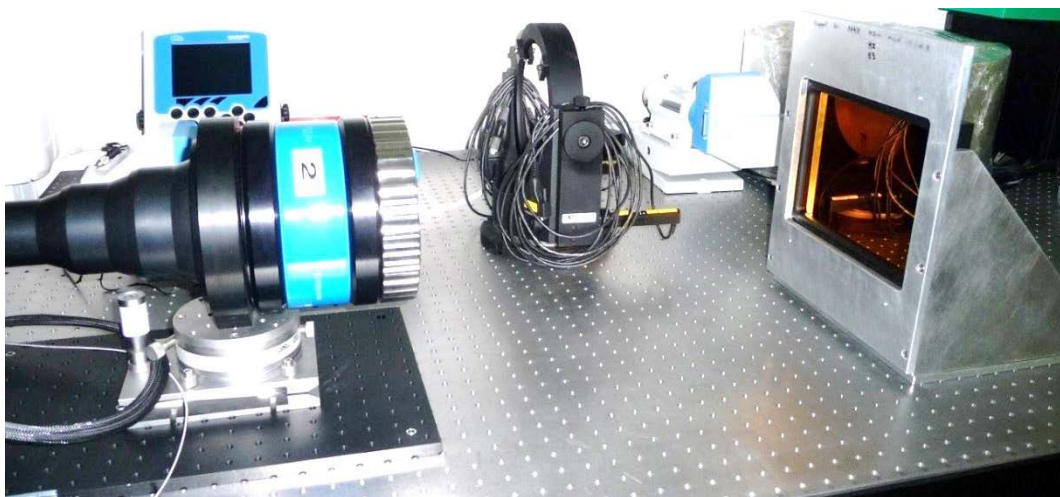


Imagen 5-18: Realizando el interferograma de superficie de M3 recubierto y en su montura preliminar.

Por último, como parte de la verificación a nivel de componente, queda realizar la prueba de supervivencia a ciclado criogénico en sus monturas. Ésta se realiza directamente en el criostato de PANIC en diciembre de 2010, junto con la ventana de entrada del criostato. Para ello previamente se realiza el alineado a nivel de subsistema de la estructura de espejos (MS, Imagen 4-13) según se explica más adelante en la sección 5.2.1.

5.1.3. FILTROS DE CIENCIA

Con los anteriores contratos lanzados para la adquisición de los componentes principales del sistema óptico, la siguiente prioridad es la adquisición del juego de filtros de ciencia con los que irá dotada la cámara para su primera luz. Dicho juego está compuesto por los filtros anchos estándares infrarrojos, **Z**, **Y**, **J**, **H** y **K_s**, y un filtro estrecho **H₂** situado dentro de la banda **K_s**. En paralelo a los trabajos de la aceptación de las lentes y sus criogenizados, se realiza la especificación de detalle del juego de filtros.

En la Tabla 5-4 se resumen sus características de paso de banda en las condiciones de trabajo del filtro de 100 K y para filtros localizados en un haz convergente con un ángulo medio de incidencia (AOI, del inglés *Angle of Incidence*) de 6.8° , estando dentro del rango entre 0° y 14.2° . El fabricante podrá tener en cuenta estas condiciones de operación durante el diseño del filtro y así asegurar que incluso los filtros estrechos operarán con la especificación requerida.

Para los filtros anchos la tolerancia en el paso de banda viene definida por un error en la longitud de onda de *cut-on* y *cut-off* de $\pm 0.5\%$. Para el filtro estrecho sin embargo se especifica la tolerancia de su paso de banda con un $\pm 0.2\%$ tanto para el valor de su longitud de onda central como de su FWHM.

La tolerancia en el espesor de los filtros viene dada por el análisis de tolerancias del sistema óptico, pues al no estar los filtros localizados en haz colimado, su espesor tiene efecto en la localización de la focal del sistema. También del análisis de tolerancias se obtiene que la calidad óptica del frente de onda transmitido del filtro ha de ser mejor que $\lambda/5$ P-V en cualquier subapertura de diámetro 20 mm, y de $\lambda/2$ P-V en la apertura óptica completa.

Otro aspecto importante del paso de banda de los filtros es el bloque fuera de la banda de paso. Debido al gran rango de sensibilidad del detector, desde 0.3 a 2.5 μm (ver apéndice A) se define un bloqueo de densidad óptica 4 fuera de la banda de paso del filtro, en el rango 0.3 a 3 μm .

Filtro	$\lambda_{\text{cut-on}}$ (μm)	λ_c (μm)	$\lambda_{\text{cut-off}}$ (μm)	FWHM (μm)	T (%)	Espesor (mm)	Espesor óptico (mm)
Z	0.830 \pm 0.004	0.877 \pm 0.009	0.925 \pm 0.005	0.095 \pm 0.009	> 80	8.27 \pm 0.10	12.00 \pm 0.15
Y	0.970 \pm 0.005	1.020 \pm 0.010	1.070 \pm 0.005	0.100 \pm 0.010	> 70	8.28 \pm 0.10	12.00 \pm 0.15
J	1.170 \pm 0.006	1.250 \pm 0.013	1.330 \pm 0.007	0.160 \pm 0.013	> 80	8.29 \pm 0.10	12.00 \pm 0.15
H	1.490 \pm 0.007	1.635 \pm 0.017	1.780 \pm 0.009	0.290 \pm 0.016	> 80	8.32 \pm 0.10	12.00 \pm 0.15
K _s	1.990 \pm 0.010	2.150 \pm 0.022	2.310 \pm 0.012	0.301 \pm 0.022	> 80	8.36 \pm 0.10	12.00 \pm 0.15
H ₂	2.106 \pm 0.006	2.122 \pm 0.004	2.138 \pm 0.006	0.032 \pm 0.004	> 65	8.36 \pm 0.10	12.00 \pm 0.15

Tabla 5–4: Especificación detallada de fabricación de los filtros de ciencia de PANIC en sus condiciones de operación.

El contrato de los filtros es realizado con “*Materion Precision Optics and Thin Film Coating Inc.*” en Estados Unidos e incluye los siguientes hitos:

- Aceptación en fábrica en base al informe de fabricación concerniente a las especificaciones de fabricación óptica.
- Aceptación de las bandas de paso en base a las curvas de transmisión teóricas correspondientes a:
 1. Curvas teóricas:
 - 1.1. A temperatura ambiente, 293 K, para iluminación AOI = 0° y haz F/8.
 - 1.2. A temperatura de trabajo, 100 K, con AOI = 0° y haz F/8.
 - 1.3. A temperatura 100 K, AOI = 0° y haz colimado.
 - 1.4. A temperatura 100 K, AOI = 6.8° y haz colimado.
 - 1.5. A temperatura 100 K, AOI = 14.2° y haz colimado.
- Aceptación de las bandas de paso en base a las curvas de transmisión realizadas sobre:
 2. Los filtros en el centro y en sus esquinas:
 - 2.1. A temperatura ambiente, para iluminación AOI = 0° y haz F/8.
 3. Las muestras testigo de cada filtro en cuatro configuraciones:
 - 3.1. A 293 K e iluminación AOI = 0° y haz F/8.
 - 3.2. A 100 K, con AOI = 0° y haz F/8.
- Revisión cosmética a la recepción, verificación dimensional.
- Ciclado criogénico a las muestras testigo de los recubrimientos.

De este modo, previo al envío de cada filtro una vez fabricado, el fabricante envía todas las curvas de transmisión acordadas junto al informe de fabricación. Del análisis de dichas curvas se puede extrapolar el comportamiento del filtro en sus condiciones de trabajo y de ese modo evaluar si cumple requerimientos. En el capítulo 6 de Resultados, en la sección 6.1.2 se detallan las características del paso banda de los filtros construidos.

Tras la recepción de los filtros en el IAA, en febrero de 2012, se realiza su inspección visual, verificación dimensional y además una segunda comprobación del paso de banda y el rango de bloqueo a temperatura ambiente. La Imagen 5-19 muestra, a modo de ejemplo, el filtro **H** tras ser recibido.

Para esto último, se mide la transmitancia de los filtros con ayuda de un espectrofotómetro (cuyas características se incluyen en el apartado E.2) en el rango de longitud de onda entre 0.3 y 3.3 μm . Dichas medidas forman parte del trabajo de máster de D^a M. I. Ferro Rodríguez (Ferro Rodríguez, 2013, September), del cual la doctoranda fue codirectora. Los datos así obtenidos tienen las mismas condiciones de medida que los datos 3.1 proporcionados por el fabricante. Los resultados corroboraron que los filtros cumplían la especificación de paso de banda requerido.



Imagen 5-19: Filtro **H** a su recepción en el IAA.

El alcance de este contrato incluye la supervivencia de los recubrimientos interferenciales a criogenizado que se hace aprovechando los criogenizados de las lentes de L5 y L7. Los filtros quedan listos a nivel de componente para su integración en la rueda de filtros. La supervivencia de los filtros en sus monturas es responsabilidad del equipo de PANIC. Y ésta se realiza directamente en el criostato de PANIC como veremos más adelante en la sección 5.2.2, apartado 5.2.2.2.

5.1.4. LENTE DE REIMAGINACIÓN DE PUPILA

Por último, se procede a la adquisición de la PIL. La función de esta lente, recordemos (sección 4.3), es permitir el alineado entre el diafragma de apertura frío interno de PANIC y el espejo primario del telescopio. En la misma sección se explicó que la solución de ingeniería óptima para la localización de esta lente es en una de las ruedas de filtros de PANIC. Su montura opto-mecánica es similar al resto de lentes del tren óptico principal, por lo que también ha de tener chaflanes.

Tras varias iteraciones con tres fabricantes distintos, finalmente esta lente se adquirió en "*Jenoptik Optical Systems, Inc.*", en Alemania, y el alcance de su fabricación incluye:

- Aceptación en fábrica en base al informe de fabricación.
- Revisión cosmética a la recepción, verificación dimensional.
- Ciclado criogénico de la muestra testigo del recubrimiento.
- Ciclados criogénicos, para supervivencia montura "tipo SESO" en criostato de pruebas.

La producción de esta lente fue relativamente rápida, desde la orden de compra en mayo de 2011 a su entrega en noviembre del mismo año (Imagen 5-20). Las razones son básicamente dos: En primer lugar en la iteración con el fabricante para la especificación de detalle se optimizó el grosor máximo tal que el fabricante ya disponía del material en bruto. En segundo lugar, al encontrarse ya diseñadas las monturas tipo SESO y haber hecho ya los criogenizados del resto de lentes, este fabricante aceptó hacer el ciclado criogénico en las mismas condiciones que el negociado con SESO. Se realiza con éxito su criogenizado (Imagen 5-21) en diciembre de 2011, junto con el testigo de su recubrimiento antirreflejante.

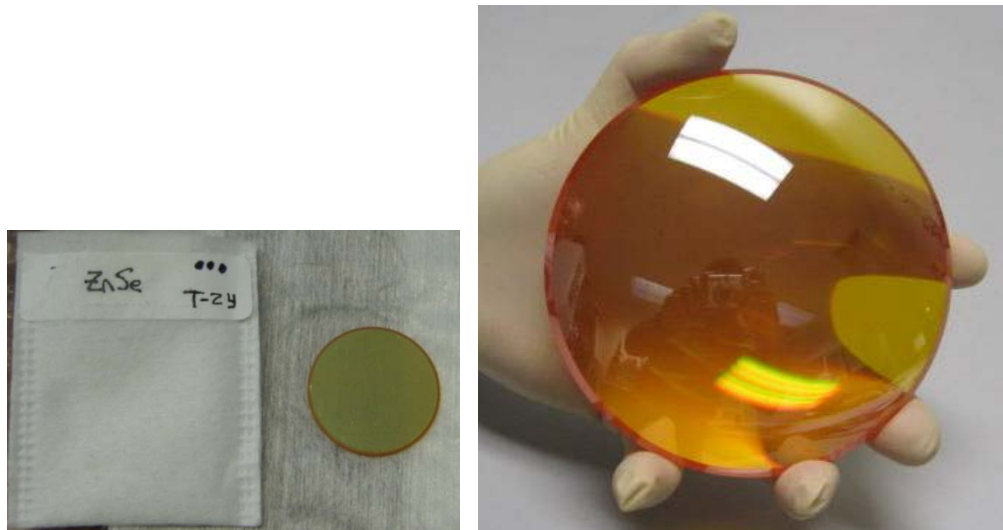


Imagen 5-20: Izqda.: Muestra testigo del recubrimiento antirreflejante de la PIL. Dcha.: PIL a su recepción.

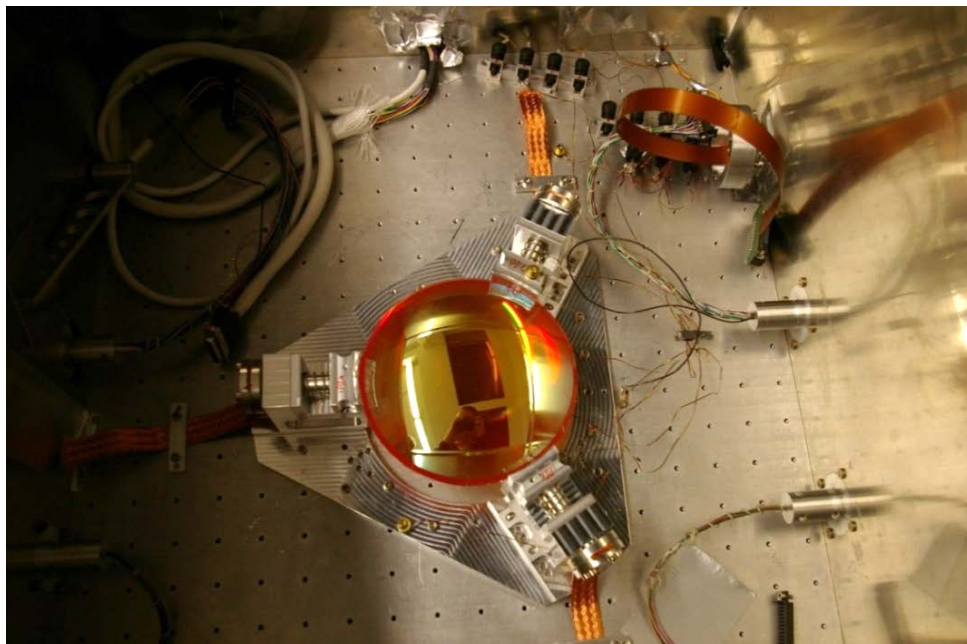


Imagen 5-21: PIL en montura "tipo SESO" dentro del criostato de pruebas justo después de su ciclado criogénico.

5.1.5. SISTEMAS AUXILIARES DISEÑADOS PARA PANIC

En el plan de AIV no solo se detallan las fases, pruebas y procedimientos del mismo, sino también las herramientas que se utilizarán para el alineado del sistema en sus diferentes etapas.

Así, se definen ciertos sistemas auxiliares que han de ser diseñados *ad hoc* para el AIV de PANIC. Estos diseños así como la adquisición de sus componentes se desarrollan en paralelo a las actividades de los contratos de adquisición de la óptica principal y en medio de la, ya comenzada, integración del instrumento. La Tabla 5-5 lista los sistemas auxiliares ópticos que se han desarrollado para el AIV de este instrumento, los cuales han sido ordenados por el paso del AIV en que se necesitarían.

Elemento	Fabricante	Contrato	Duración
Ventana de salida del criostato	<i>Greenlight Solutions</i>	516 €	Diciembre 2009 – Febrero 2010
Espejo auxiliar: MMS	MPIA + <i>Kugler</i>	--	Abril 2010 – Mayo 2010
Dianas de alineado	MPIA	--	Mayo 2010 – Noviembre 2010
Espejo auxiliar plano-paralelo: MLM2	<i>Fraunhofer IOF</i>	2900 €	Junio 2013 – Agosto 2013
Máscara de foco	MPIA	--	Febrero 2014
Simulador de estrella, SS	Varios proveedores de óptica comercial	3.600 €	Agosto 2011 – Septiembre 2011

Tabla 5-5: Sistemas auxiliares del AIV de PANIC.

5.1.5.1. VENTANA DE SALIDA DEL CRIOSTATO DE PANIC

Un aspecto crucial del alineado de PANIC es la verificación en frío del eje opto-mecánico del instrumento. PANIC sería alineada a temperatura ambiente, y luego se cerraría el criostato para hacer vacío y enfriar toda la cámara. La doctoranda, ya desde la fase de PDR planteó la necesidad de otra ventana detrás del plano focal de PANIC, en la línea de visión del eje óptico de la cámara, a la que se llamó "ventana de salida". Esta herramienta de ingeniería se previó en las primeras fases de la cámara, con lo que fue posible implementarla en el diseño del criostato de PANIC.

Su localización, justo detrás del detector, proporciona la línea de visión del eje opto-mecánico (Imagen 5-51). De forma que siempre que el detector no se encuentre instalado, la luz que entra por la ventana de entrada del criostato sigue el camino óptico a través de toda la óptica de PANIC y emerge por la ventana de salida.

Esta herramienta es utilizada intensamente durante la verificación del eje opto-mecánico en frío para la determinación del mismo mediante la medida de las dianas mecánicas instaladas dentro del instrumento (las dianas se explican a continuación en el apartado 5.1.5.3). Este alineado del eje opto-mecánico del instrumento se explica en la sección 5.2.4.

Una vez instalada las lentes en el camino óptico de PANIC, y antes de la primera instalación del detector, también se hace uso de la ventana de salida para hacer una primera comprobación de la longitud focal trasera del sistema.

Tanto la definición como la adquisición de esta ventana fue rápida al ser de pequeño tamaño, no necesitar de chaflanes, no requerir de recubrimiento antirreflejante

y requerir de una calidad óptica, $\lambda/5$, relajada. Las mayores consideraciones es diseñarla para la diferencia de presión y en material transparente en las longitudes de onda de trabajo de PANIC.

El material de la ventana de salida del criostato es sílice fundido (*Fused Silica*, en inglés) de características físicas idénticas a la ventana de entrada y transparente en el visible para permitir las funciones de alineado previstas. Tiene un diámetro de 100 mm y un espesor de 12 mm.

El grosor mínimo necesario para una ventana de este diámetro y este material es 6.1 mm (ecuación [4.8]). Así que se optó por definir un espesor mayor, tanto por seguridad como por abaratar coste en la fabricación de la misma, pues para pulido óptico de un elemento plano es recomendable mantener una relación grosor/diámetro mayor o igual a 0.1.

La ventana es aceptada en fábrica en base al informe de fabricación y en el IAA tras su revisión cosmética a la recepción, verificación dimensional y un análisis del interferograma de la misma para verificar el error del frente de onda en transmisión (Imagen 5-22). De nuevo su supervivencia a ciclado criogénico es responsabilidad del equipo de PANIC al ser sus condiciones de supervivencia las de sobrevivir a la diferencia de presión y temperatura. Se realiza directamente en el criostato de PANIC en diciembre de 2010 junto la ventana de entrada y la estructura de espejos.

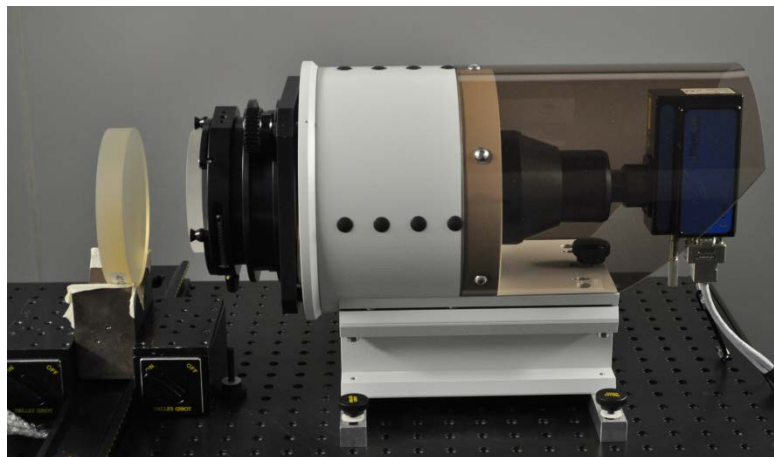


Imagen 5-22: Ventana de salida del criostato de PANIC durante la verificación de su calidad de superficie mediante un interferómetro.

5.1.5.2. ESPEJOS AUXILIARES: MMS Y MLM2

Se establecen dos espejos planos auxiliares fabricados en aluminio para realizar el alineado del sistema:

- MMS: Espejo plano-paralelo de una sola cara para el alineado de la estructura de espejos de doblado, tal que puede ser instalado tanto en el puerto de entrada de la MS, como en el de salida.
- MLM2: Espejo plano-paralelo para el alineado del eje opto-mecánico de PANIC, para ser instalado en puerto de entrada del barril LM2.

Con el objeto de instalarlos en los puertos requeridos y dado que para el alineado no se requiere de calidad óptica, se opta por fabricarlos en aluminio que permite la mecanización deseada de la pieza. El ingeniero mecánico diseña estos espejos, cuyos

requerimientos de coplanariedad entre ambas caras ha de ser mejor que $20 \mu\text{m}$ (~ 15 arcsec) y de calidad de superficie mejor que $1 \mu\text{m}$ (equivalente a $1.6 \cdot \lambda = 3.2$ fringes) obtenida por torneado con punta de diamante.

El primero de estos espejos, para la MS, es una pieza de aluminio plano-paralela, tal que la cara anterior y posterior son paralelas entre sí con un error menor a los 16 arcsec. En la cara anterior se pule la superficie espejada (directamente en aluminio) y su interfaz es tal que se puede montar tanto en el puerto de entrada de la estructura de espejos como en el de salida (Imagen 5-29).

Este espejo se utiliza para el ajuste y alineado de la MS (sección 5.2.1) en laboratorio y también para el ajuste de la OM1 en el banco óptico de PANIC, como veremos más adelante (sección 5.2.4).

Es recibido en mayo de 2010 (Imagen 5-23) y medida su coplanariedad con ayuda de dos autocolimadores. Disponiendo éstos enfrentados y coalineados, se introduce el espejo auxiliar entre ambos y se mide el paralelismo entre ambas caras del mismo. El resultado para nuestro espejo auxiliar es de **1 arcsec en el eje X** y de **7 arcsec en el eje Y**.

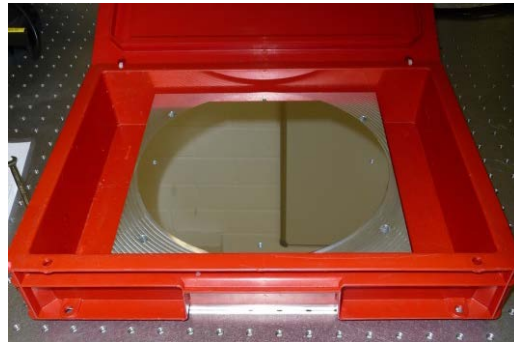


Imagen 5-23: Espejo auxiliar de aluminio para el alineado a temperatura ambiente de la MS.

El segundo espejo auxiliar es una pieza de aluminio plano-paralela, con una coplanariedad mejor que 16 arcsec y esta vez con ambas caras espejadas y una marca central de referencia. Su interfaz permite ser instalado con precisión en la LM1, en el puerto de entrada de la LM2 (entrada de la rueda de pupilas) y en el puerto de salida de la LM3 (salida de la unidad de rueda de filtros). Este espejo fue concebido en 2013 por el equipo de PANIC tras la primera etapa de alineado del sistema. Las pruebas realizadas para el alineado de la OM1 y la MS revelaron que había un desalineamiento que no podía ser identificado. Este espejo venía a ayudar a medir el ángulo del eje en más posiciones, en concreto tras cada barril, para determinar cuál era la estructura mecánica que estaba provocando los problemas.

5.1.5.3. DIANAS DE ALINEADO

El eje opto-mecánico del sistema se establece en base a unas dianas lineales que la doctoranda propone en el plan de AIV. Estas dianas, fabricadas en aluminio, son atornilladas directamente al banco óptico y tienen dos "dedos" cuyos bordes han sido mecanizados con gran precisión tal que la altura del eje opto-mecánico, L , a temperatura ambiente tiene una precisión de $\pm 10 \mu\text{m}$ (ver Imagen 5-24). En la sección 5.2.4 se da más detalle de la altura de este eje, tanto a temperatura ambiente, como en criogenia

(L'). La Tabla 5-7 y la Imagen 5-48 muestra la serie de dianas que se han establecido a lo largo del eje óptico para el alineado del instrumento.

Como ejemplo del diseño mecánico de las mismas se muestran los planos de fabricación de las dianas T1 y TB2 (Imagen 5-25), las cuales se presentan en la Imagen 5-47 fabricadas e instaladas en el instrumento.

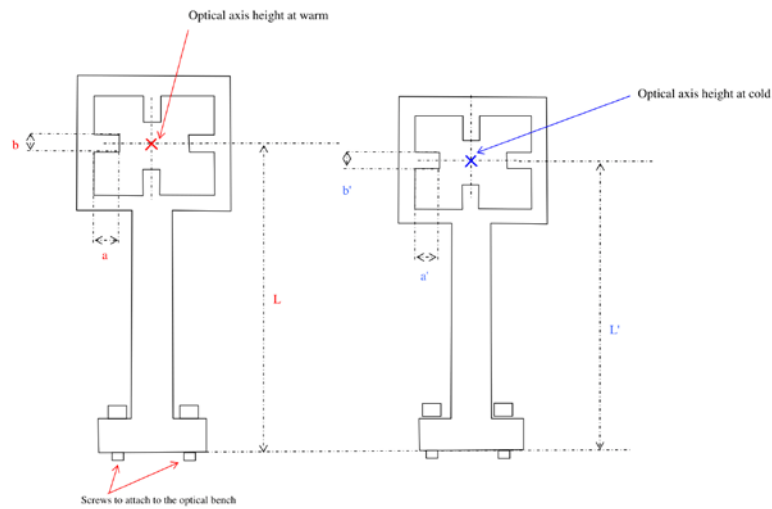


Imagen 5-24: Esbozo de la propuesta de dianas lineales para el alineado en caliente y verificación en frío del eje opto-mecánico de PANIC.

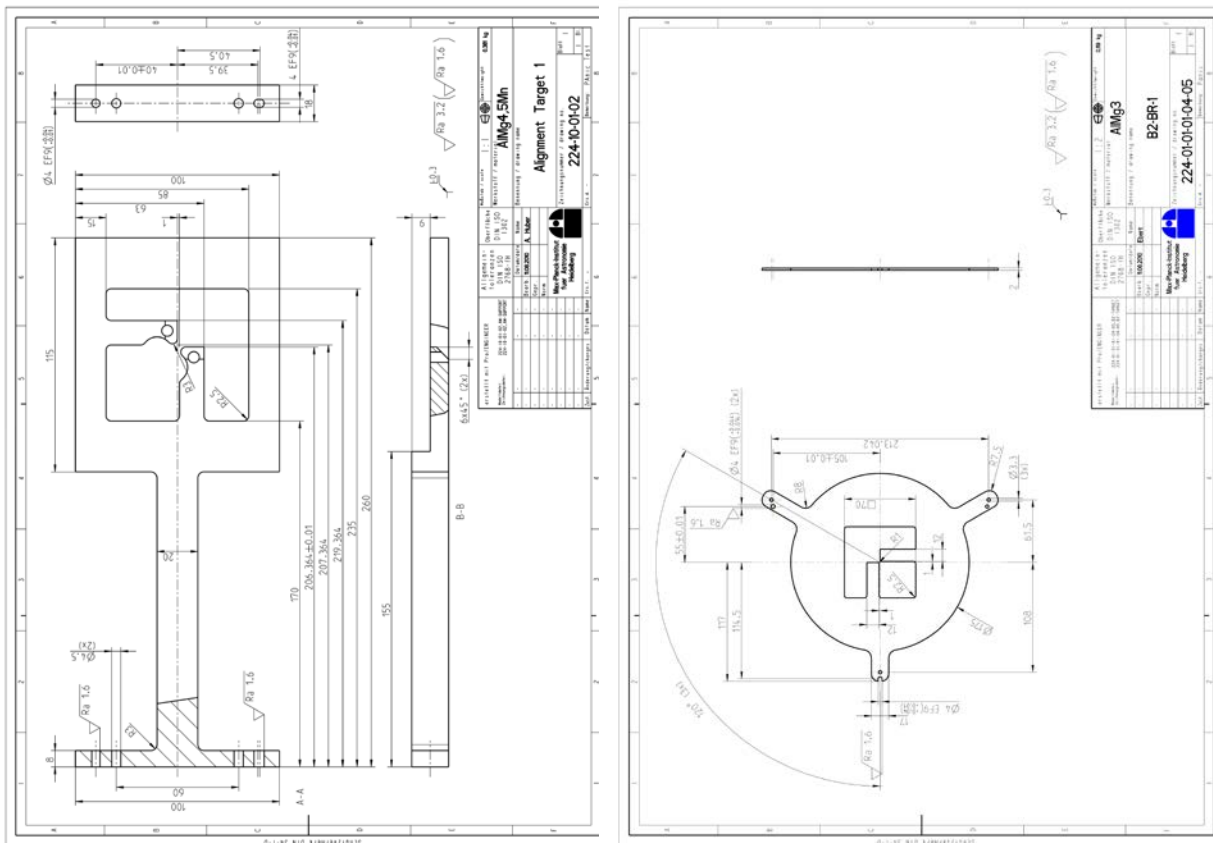


Imagen 5-25: Planos de fabricación de dos de las dianas de alineamiento. Izqda.: T1 y dcha.: TB2.

5.1.5.4. MÁSCARA DE FOCO

Con el objetivo de ajustar el mosaico de detectores de PANIC en su posición óptima (5.2.6), se diseña una máscara para instalarla en la posición del diafragma de campo, justo detrás de L1. La imagen de esta máscara mediante LM2, LM3 y LM4 se encuentra conjugada con la posición óptima del foco de PANIC.

La máscara de foco es un disco de aluminio en el que se han practicado múltiples agujeros de **0.3 mm de diámetro (7.8 px en el detector)**, dimensión teórica de acuerdo con el modelo óptico). La distribución de estos agujeros es tal que cubre todo el plano focal y permite tanto la determinación de la posición en foco Z, como la inclinación.

La máscara contiene un patrón de aperturas a la distancia Z del foco nominal que es un círculo de diámetro 123.2 mm, otro juego antes y otro después a distancias de -2, -1, 0, +1 y +2 mm). La Imagen 5-26 muestra el plano de fabricación de dicha máscara y la Imagen 5-55 la máscara construida. Por tanto, las imágenes de los agujeritos en el detector se encuentran diferentemente enfocadas y con esa información se puede determinar cuál es la mejor posición del plano focal y calcular la corrección necesaria a realizar en el anillo de la interfaz entre L9 y la FPA.

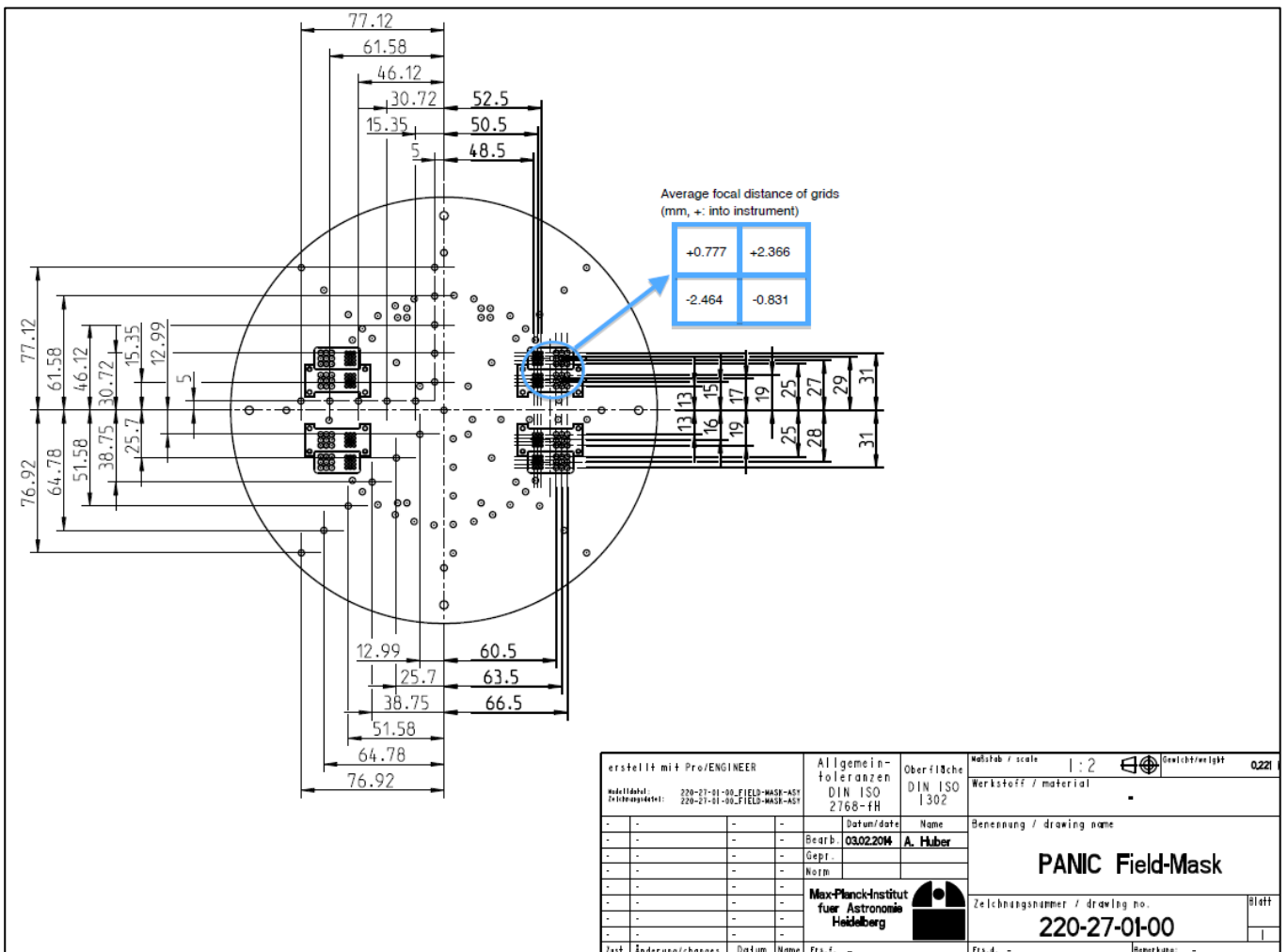


Imagen 5-26: Plano de fabricación de la máscara de foco utilizada para el ajuste del detector de PANIC.

5.1.5.5. SIMULADOR DE ESTRELLA, SS

Esta herramienta fue diseñada *ad hoc* para la verificación de la calidad de imagen de PANIC en laboratorio, y también ha sido diseñada e integrada por la doctoranda. Se usa tanto antes de su transporte (sección 5.2.7), como después de él (sección 5.3.1). Éste es un sistema óptico auxiliar que se instala delante de la ventana de entrada del criostato (Imagen 5-62) y proyecta un pequeño círculo de luz en el plano focal del telescopio, que actúa como una estrella artificial. El sistema trabaja en varias longitudes de onda, cubriendo el rango espectral de PANIC. Además la interfaz mecánica de acople a PANIC permite al SS ser instalado en diferentes posiciones del plano perpendicular al eje óptico posibilitando así muestrear diferentes el campo de visión y por tanto todo el plano focal del detector. El diseño óptico detallado se presenta en el apéndice D.

5.2. FASE DE ALINEADO, INTEGRACIÓN Y PRUEBAS DE INGENIERÍA FINALES EN LABORATORIO

La penúltima fase de esta memoria engloba todo el montaje de los distintos componentes y subsistemas, además de su alineado y testeado en el sistema completo. El trabajo de la doctoranda en esta fase comprende mucho trabajo experimental e implica, una aún más estrecha, colaboración con ingenieros mecánicos, criogénicos, electrónicos y de software, así como con el equipo científico, para realizar la integración del equipo tal que se cumplan los requerimientos científicos del instrumento.

Esta fase se extiende desde mayo de 2010 hasta agosto de 2014, simultaneando actividades con la fabricación y aceptación de los componentes (sección 5.1) durante los dos primeros años, según ya se ha mencionado.

El diseño final PANIC (Huber, Baumeister, Rohloff, & Fried, 2009) proporciona el agrupamiento mecánico final de su diseño óptico (Imagen 4-13) y, por tanto, establece el orden en que los distintos subsistemas han de ser integrados y luego montados en el criostato de PANIC. Así está contemplado en el plan de AIV. La estructura jerárquica comienza desde nivel de subsistema hasta nivel de sistema.

A nivel de subsistema se realizan las siguientes actividades:

- Establecer y efectuar las pruebas de verificación e integración de cada uno de los subsistemas: MS, LM2 y LM3.
- Integración opto-mecánica de los espejos de doblado en sus monturas, alineado en caliente de la estructura de espejos y criogenizado para la comprobación de su supervivencia.
- Montaje opto-mecánico y ajuste de las lentes individuales en sus correspondientes monturas: de L1 a L9 y PIL.
 - Integración de los filtros de ciencia y de la PIL en las ruedas de filtros.
 - Retroalimentación del diseño óptico final con todos los valores reales (no teóricos) de los parámetros ópticos construidos para determinar los compensadores mecánicos en el eje Z: distancia L2-L3 y distancia L7-L8.

- Integración opto-mecánica de los dos barriles de lentes LM2 y LM3 y ajuste interno de los sendos compensadores de descentrado (en L2 y L6, respectivamente), mediante análisis interferométrico.

La integración a nivel de sistema engloba las siguientes tareas:

- Retroalimentación del modelo óptico anterior también con los valores reales de los parámetros opto-mecánicos construidos, para producir el modelo construido ("as-built") del sistema, que es el más realista a la finalización de un instrumento.
- Establecimiento del eje opto-mecánico del instrumento a temperatura ambiente y su verificación en criogenia.
- Integración de los diferentes subsistema: OM1 (compuesto por L1, Baffle 2, MS, rueda de pupilas y LM2) y OM2 (compuesto por LM3, la unidad de ruedas de filtros y LM4).
- Integración de los anteriores en el instrumento completo, con todas las pruebas ópticas que conllevan, en caliente, y su verificación en las condiciones criogénicas de trabajo del instrumento.
 - Montaje, alineado y ajuste del sistema auxiliar: el simulador de estrella.
 - Integración y alineado del mosaico de detectores, con los consecuentes ciclados criogénicos para ajustar su posición.
 - Verificación y calibración de todo el sistema completo y optimización de sus prestaciones según el plan de AIV establecido.
 - Desmontaje del sistema para su transporte.

5.2.1. ESTRUCTURA DE ESPEJOS DE DOBLADO

Una vez aceptados los espejos a nivel de componente en mayo de 2010, los tres espejos de doblado se integran en sus correspondientes monturas (ver Imagen 5-17) y se les realiza un interferograma de la superficie óptica como ya se describió en la sección 5.1.2.

Ese mismo mes, se integran en la estructura de los espejos (en verde en la Imagen 5-27) y se alinean mediante remecanizado de su marco de interfaz a dicha estructura (en púrpura en la Imagen 5-27) hasta que la inclinación del eje óptico-mecánico de salida con respecto al de entrada, está dentro de las tolerancias y es menor que 1.2 arcmin (Tabla 4-9).

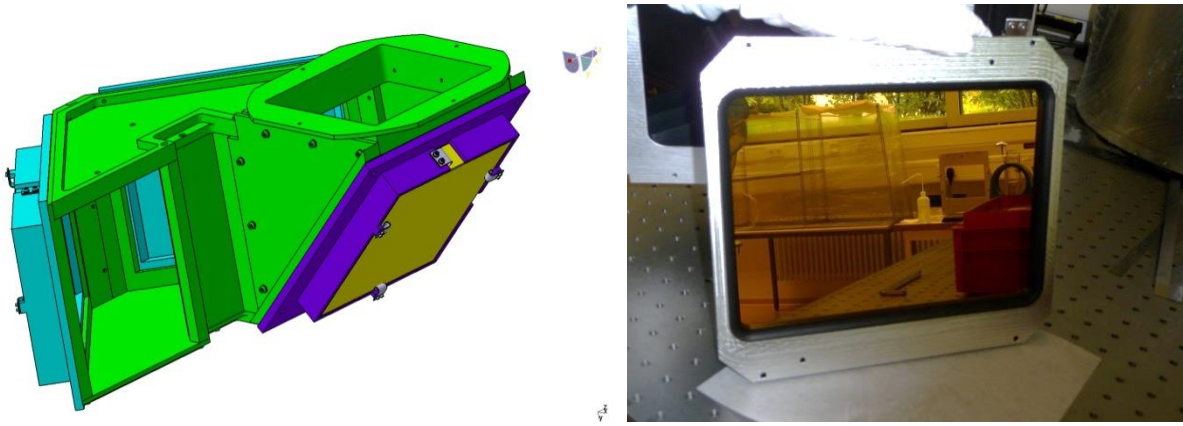


Imagen 5-27: Izqda.: Modelo mecánico de la estructura de los espejos. Dcha.: Espejo M2 integrado en su montura después del remecanizado de su interfaz.

Para la medida del eje ópto-mecánico se utilizan dos herramientas esenciales: un autocolimador (descrito en E.1) y el espejo auxiliar diseñado para el alineado de la MS (descrito en 5.1.5.2).

Recordemos que este espejo auxiliar (Imagen 5-29) puede ser montado tanto en el puerto de entrada como en el de salida de la MS y que su coplanariedad fue medida obteniendo el siguiente resultado: 1 arcsec en el eje X y de 7 arcsec en el eje Y (ambas cantidades con un error de ± 0.1 arcsec).

Usando el autocolimador se mide la inclinación del espejo auxiliar instalado en ambos puertos, entrada y salida, de la estructura de espejos (Imagen 5-28). Tomando la entrada como referencia se determina la inclinación del eje opto-mecánico de salida. Mediante iteración de la medida de la inclinación y después de varios remecanizados de las interfaces de las monturas de los espejos, se consigue alinear los espejos dentro de tolerancias, 1.2 arcmin. En condiciones estáticas se obtiene que el residuo es inferior a los: **(5 \pm 1) arcsec en el eje X y (15 \pm 7) arcsec en el eje Y.**

De este modo el subsistema queda preparado para su integración en el banco óptico de PANIC.



Imagen 5-28: Izqda.: Midiendo la orientación del eje opto-mecánico de entrada a la estructura de espejos. Dcha.: Midiendo dicho eje a la salida de la estructura de espejos.

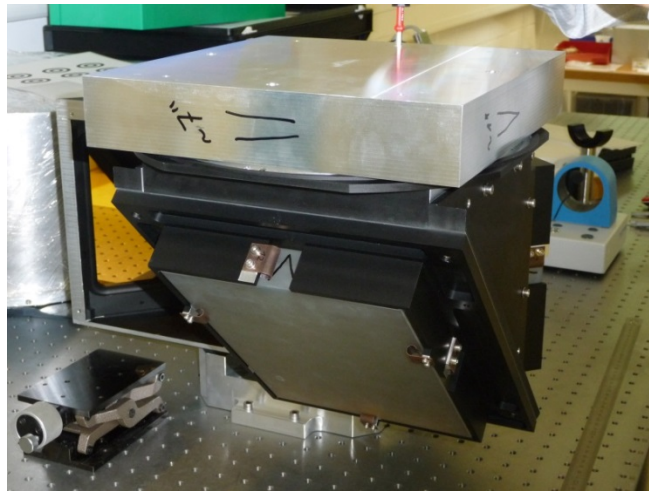


Imagen 5-29: Espejo auxiliar montado en el puerto de entrada de la estructura de espejos.

Como ya se ha mencionado con anterioridad, la supervivencia a ciclado criogénico en sus monturas se realiza directamente en el criostato de PANIC en diciembre de 2010, junto con las ventanas de entrada y de salida del criostato.

Ya más avanzado el AIV, se analizan las flexiones de PANIC en condiciones dinámicas, dado que PANIC está en movimiento durante su operación en telescopio. De este modo, en febrero de 2013, se realizan también pruebas de variación del eje opto-mecánico de la estructura de espejos en función del ángulo cenital (Imagen 5-30) para verificar que está dentro de tolerancias incluso en condiciones dinámicas, obteniéndose un cambio en la inclinación del eje óptico **menor de 20 arcsec** cuando se varía el **ángulo cenital hasta 60 grados**. Recordemos que de acuerdo con el análisis de tolerancias del diseño final el máximo permisible es ± 1.2 arcmin (Tabla 4-9). El informe técnico (Bizenberger & Huber, PANIC Bending Tests with the Mirror Structure, 2013, May) recoge estas pruebas y los resultados.



Imagen 5-30: Montaje experimental para la medida dinámica del eje opto-mecánico de la estructura de espejos.

5.2.2. LENTES Y FILTROS

La finalización de la fabricación de las monturas de las lentes tuvo un retraso considerable y finalmente fueron recibidas en mayo de 2012. Una vez recibidas la doctoranda procede al montaje de las lentes entre los meses de mayo a junio de 2012.

5.2.2.1. LENTES

Las nueve lentes que conforman el tren óptico, más la PIL de ingeniería, se montaron a temperatura ambiente en sus correspondientes monturas individuales.

Para describir el proceso, utilicemos la L2. En la Imagen 5-31 se muestra el diseño mecánico final del barril LM2 que contiene a L2.

- En una disposición horizontal (como la que se muestra en la Imagen 5-34), se deposita la lente en la montura cónica (pieza en verde claro en la Imagen 5-31), tal que el chaflán de la lente quede asentado en la dicha parte cónica.
- Seguidamente se deposita encima de la lente el anillo de retención (en mostaza en la figura) tal que, de nuevo, el chaflán de la lente y la parte cónica del anillo queden correctamente asentados.
- A continuación se instala dicho anillo a la montura anterior mediante 8 tornillos M3/12 (de métrica 3 y 12 mm de longitud) dispuestos perimetralmente (Imagen 5-34) sin llegar a apretar los tornillos completamente.

Estos tornillos llevan un determinado número de arandelas cónicas de acero calculadas para cada elemento en particular según la fuerza que tengan que ejercer en frío, y limitado por un tubo cilíndrico de longitud determinada por el diseño mecánico detallado, tal que el tornillo tenga la precarga establecida en frío.

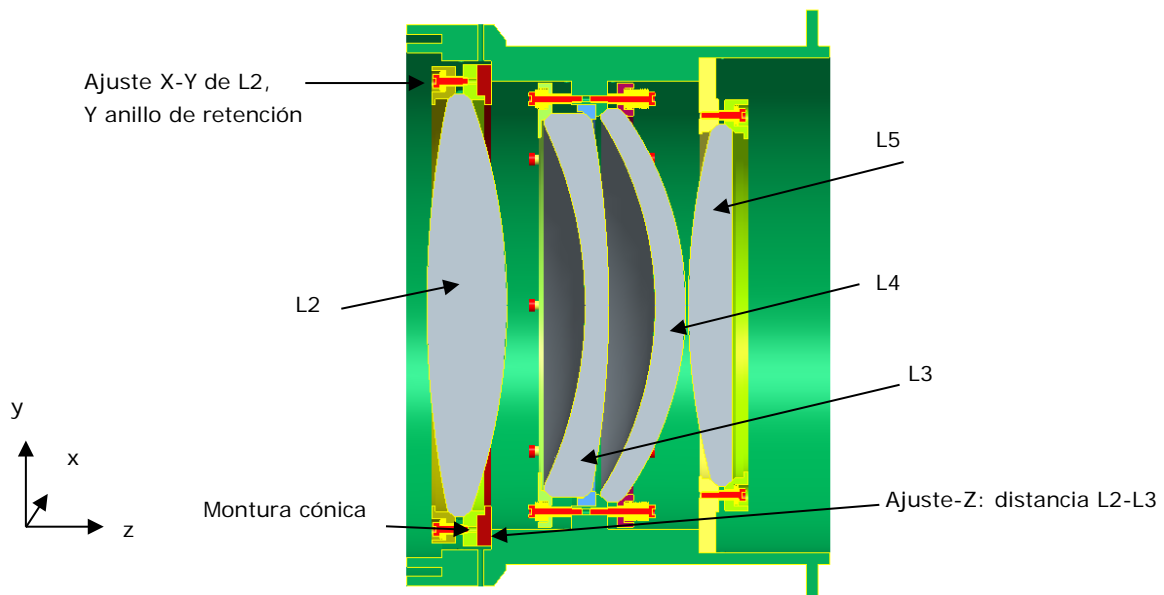


Imagen 5-31: Diseño mecánico de LM2.

- Ahora, con los 8 tornillos presentados y sin apretar del todo, se va centrando la lente en su montura.

Para ello, la montura dispone de cuatro pares de agujeros localizados a 90° (Imagen 5-32). En cada par de agujeros, uno es roscado y otro simplemente pasante. El roscado se usa para el ajuste de la lente en posición mediante un

tornillo con paso de rosca fino que empuja lentamente la lente. El pasante se usa para medir la posición de la lente con respecto al perímetro exterior de la montura que se toma como referencia común. En él se introduce un micrómetro de profundidad que permite medir con una precisión de $\pm 5 \mu\text{m}$ (Imagen 5-33).

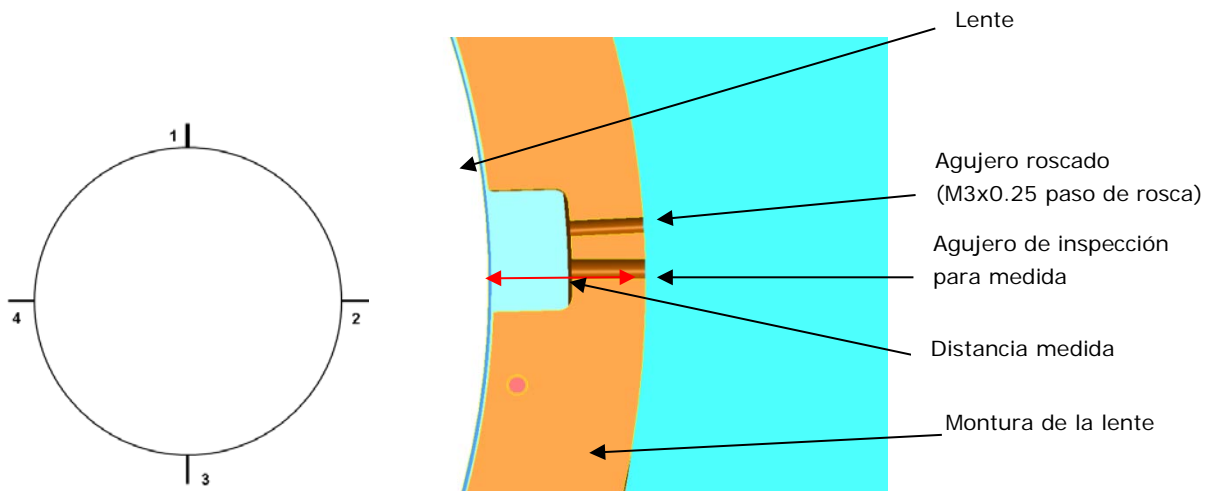


Imagen 5-32: Izqda.: Localización en la montura de los cuatro pares de agujeros para centrar e inspeccionar el centrado de la lente en su montura. Dcha.: Detalle del diseño mecánico de cada punto de inspección.



Imagen 5-33: Midiendo posición de la L4 con el micrómetro de profundidad.

El proceso de ajuste se realiza de forma iterativa, midiendo las cuatro posiciones y acomodando la lente con los tornillos de ajuste hasta que las cuatro distancias sean iguales, dentro de las tolerancias establecidas en el presupuesto de errores, menor que $50 \mu\text{m}$. Entonces se considera la lente centrada en su montura en **X** e **Y**.

- e) Por último, con la lente centrada dentro de tolerancias, se aprietan los 8 tornillos perimetrales de forma progresiva y simétricamente, quedando la lente fijada en su posición.

La Imagen 5-34 corresponde a L2 una vez integrada y centrada en su montura.

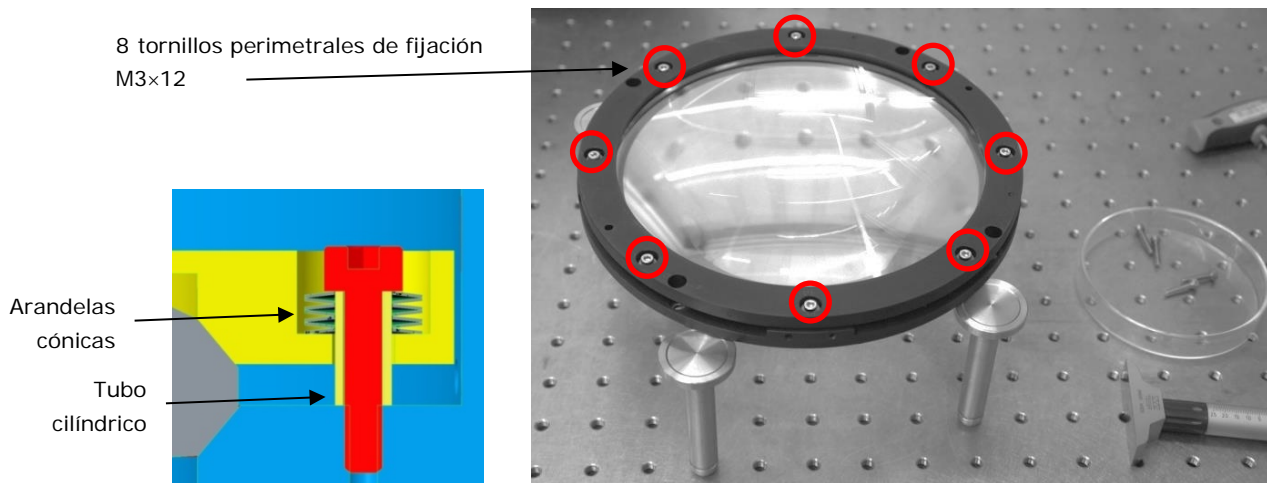


Imagen 5-34: Izqda.: Tornillos con 7 arandelas cónicas. Dcha.: L2 integrada y centrada en su montura real.

La lente reimaginadora de pupila también se integra del mismo modo en su montura (Imagen 5-35) y luego más adelante en la rueda de filtros número 1 (Imagen 5-36).

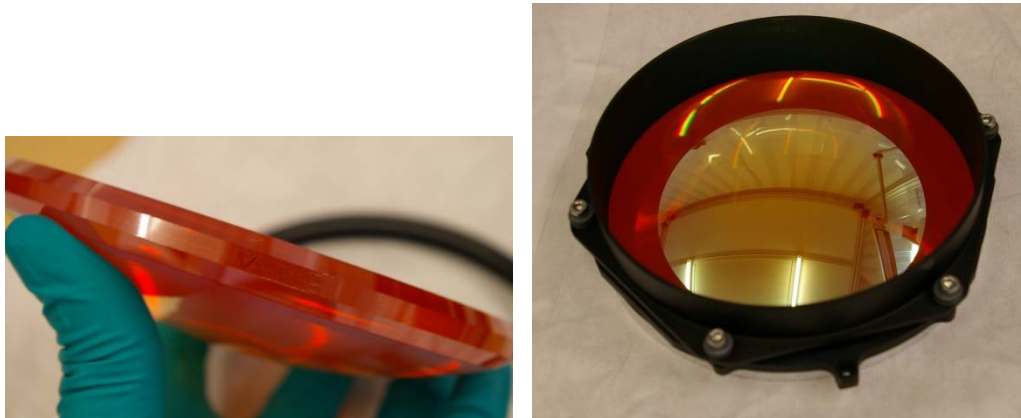


Imagen 5-35: Izqda.: Foto de la PIL donde se aprecian sus chaflanes en ambas caras de la lente. Dcha.: PIL integrada y centrada en su montura real.

Una vez montadas y centradas todas las lentes a temperatura ambiente se registran los valores residuales de los centrados.

Con objeto de verificar su correcto centrado después de ser sometidas a ciclados criogénicos, las lentes en sus monturas se montan en su correspondiente barril y éstos en el banco óptico de PANIC.

Durante la integración y alineado de las estructuras OM1 y OM2 (sección 5.2.5) todas las lentes son sometidas a varios ciclados criogénicos permitiendo así volver a medir sus centrados a temperatura de laboratorio después de los ciclados. Algunos valores varían y son ligeramente superiores, apenas sobrepasan las 50 μm . Sin embargo, se comprueba que las lentes vuelven a la misma posición en frío ya que el alineado del eje opto-mecánico del sistema se mantiene (según se comprueba durante el alineado completo del sistema, sección 5.2.5).

5.2.2.2. FILTROS

PANIC dispone de **cuatro ruedas de filtros**, numeradas de tal modo que la número 1 es la más cercana a la lente L8 y la número 4 la más cercana a la lente L9, como se ha mencionado anteriormente.

Cada rueda posee 6 posiciones que se numeran comenzando por la posición superior (a la 12 h de un reloj) y aumenta en sentido horario.

La integración de los filtros de ciencia y de la PIL en las ruedas de filtros se realiza más adelante, en noviembre de 2013, cuando el AIV del instrumento se encuentra más avanzado, pues éstos no son necesarios durante las etapas de alineado y ajuste del sistema. Los filtros, la PIL, las posiciones en ciego y las posiciones abiertas, serán necesarios para el ajuste del detector. La instalación de estos elementos se realizará cuando se encuentran finalizados todos los componentes de las cuatro ruedas de filtros: la mecánica de las ruedas en sí, las monturas de los filtros, los cierres ciegos (en inglés *blank*), todos sus mecanismos y la electrónica aparejada (Imagen 5-36 e Imagen 5-37). La disposición final de los elementos que pueblan las ruedas se presenta en la sección 6.1.2 (Tabla 6-3), siendo la disposición final preparada para comisionado en telescopio la que aquí se presenta.

Dado que la supervivencia de los filtros en sus monturas es responsabilidad del equipo de PANIC se decide tan solo instalar el filtro K_S y la PIL. Dicha supervivencia se realiza directamente en el criostato de PANIC aprovechando uno de los ciclos del alineado del resto del instrumento en noviembre de 2013.

Como resultado la PIL no presenta ningún daño, pero, en cambio, el filtro sí. Tras diversas medidas mecánicas y comprobaciones, se decide tomar el riesgo de quitar el anillo de protección de aluminio que rodea a todos los filtros fabricados. Esta actividad la ha de realizar directamente el fabricante de los filtros. Tras dicha operación, los filtros son recibidos en el MPIA en mayo de 2014. En paralelo se compra un nuevo filtro K_S al haber quedado el primero no apto para uso científico.

Una vez recibidos todos los filtros, ahora sin anillo, el equipo de mecánicos de PANIC realiza con éxito el ciclado criogénico de todos ellos, cuyos resultados se recogen en el informe técnico (Bizenberger, Huber, & Bernhard, PANIC Re-worked filters Acceptance & Verification Report, 2014, September).



Imagen 5-36: Vista desde el telescopio de las ruedas de filtros 1 y 2. Izqda.: en la rueda 1 los filtros **Y** (posición 1), **H** (2) y **J** (5), la PIL (3) y una posición ciega (4). Dcha.: rueda 2 con los filtros **Z** (1), **K_S** (2) y **H₂** (4), una posición ciega (3).



Imagen 5-37: Unidad de ruedas de filtros preparada para su integración en el banco óptico de PANIC.

5.2.3. BARRILES DE LENTES

El siguiente nivel de montaje de subsistema corresponde a la integración opto-mecánica y ajuste de los dos barriles de lentes LM2 y LM3.

Durante los meses de mayo a junio de 2012, conforme la doctoranda integra las lentes en sus monturas (5.2.2), consecutivamente monta éstas en los correspondientes barriles. En el caso de estos dos barriles de lentes, recordemos que en ellos van implementados los compensadores mecánicos ya explicados en la sección 4.3.1.

Según lo previsto en el plan de AIV, para relajar tolerancias de montaje y ajuste, se retroalimenta el diseño óptico con los parámetros de las lentes construidas. El fabricante de las lentes proporciona las medidas del índice de refracción del S-FTM16 y los parámetros de las lentes a temperatura ambiente. Éstos son calculados para la temperatura de trabajo del instrumento e introducidos en el modelo óptico frío.

Ahora se re-optimiza el modelo óptico por última vez, dejando los parámetros de las lentes fijos (grosor, radios de curvatura, índices de refracción) y las distancias finales calculadas por el modelo opto-mecánico. Tan solo se deja como variables las distancias entre elementos correspondientes a los dos compensadores mecánicos en el **eje Z**, previstos en el modelo óptico final, obteniéndose sus valores finales para la distancia: **entre L2-L3** dentro de LM2 y **entre L7-L8** dentro de LM3.

Antes de continuar con el proceso de integración de los barriles es necesario recordar aquí el cambio de temperatura de trabajo de PANIC y sus consecuencias en el diseño óptico. Como se ha mencionado, el primer ciclado criogénico del instrumento con componentes ópticos tiene lugar en diciembre de 2010, en el cual se cicla por primera vez las ventanas de entrada y de salida del criostato y la estructura de los espejos. Se hace otro ciclado en enero de 2011. De estas pruebas de criogenizado de PANIC, el equipo de criogenia y mecánica reporta en febrero de 2011 que no es posible llegar a los 80 K de diseño en todos los elementos ópticos de PANIC y determinan que las temperaturas reales de

trabajo de los distintos elementos ópticos son: toda la óptica a 95 K, los filtros y la PIL a 100 K, y la ventana de entrada al criostato a temperatura ambiente.

Estos resultados obligan a adaptar el diseño óptico final, realizado para 80 K, a las nuevas y reales temperaturas de trabajo, cambiando la estrategia inicial prevista en el plan de AIV aprovechando que el diseño detallado de los barriles de las lentes todavía no había finalizado.

En primer lugar, la doctoranda, vuelve a generar los modelos de los vidrios para el índice de refracción y para el coeficiente de expansión térmica, esta vez para los materiales de las lentes y el aluminio a 95 K y, para Infrasil (filtros) y ZnSe (PIL), a 100 K.

En segundo lugar, en febrero de 2011 todos los componentes ópticos, lentes y ventanas, se encuentran ya fabricados y aceptados (excepto la PIL y los filtros). De forma que ya no se pueden establecer como variables en el diseño óptico los parámetros de las lentes. Se calculan los parámetros de las lentes a la nueva temperatura de trabajo a partir de los medidos por del fabricante y se introducen los nuevos modelos de vidrios. Con esta información introducida en el modelo óptico se re-optimiza estableciendo como variable los espacios de separación entre lentes.

En tercer lugar, chequea y acuerda los nuevos espacios entre lentes con el equipo mecánico, éste actualiza las especificaciones de los barriles de las lentes para su fabricación.

Cuando en mayo de 2012 se reciben los barriles de las lentes, se continúa con el procedimiento previsto en el plan de AIV. De este modo, se introduce en el modelo óptico sus medidas *as built* de todos los espacios entre lentes y así se procede a la determinación final de los dos mencionados compensadores mecánicos en el eje Z mediante la reoptimización del modelo óptico y el correspondiente análisis de tolerancias ajustado ahora a los valores construidos de los barriles.

Estos compensadores en eje Z son implementados mediante sendos anillos espaciadores que determinan la distancia **entre L2-L3** dentro de LM2 y **entre L7-L8** dentro de LM3.

Entre los meses de junio a noviembre de 2012, se fabrican dichos anillos espaciadores, y seguidamente se ensamblan los barriles LM2 y LM3. Como ejemplo, en la Imagen 5-38 se muestra dicha integración para el caso del barril LM3.

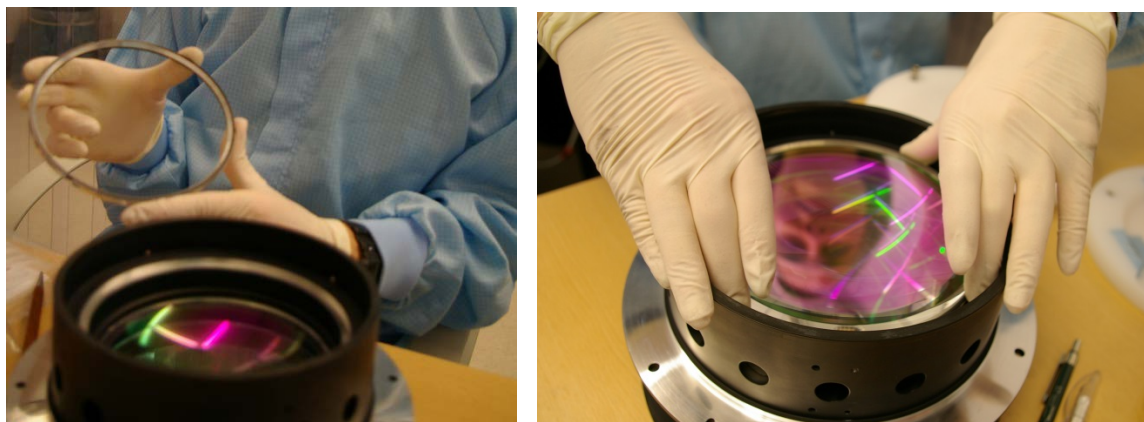


Imagen 5-38: Integración del barril LM3. A la izqda.: anillo fabricado del compensador de distancia en el eje Z de este barril.

Los compensadores de descentrado previstos en el diseño final se encuentran en **L2** (para el barril LM2) y en **L6** (en el barril LM3). Ambas lentes pueden ser descentradas en el **eje X** y en el **eje Y** (perpendiculares al eje óptico) en el rango previsto por el análisis de errores (recordar sección 4.3.1 del diseño óptico de FDR), que es como mínimo de ± 0.2 mm en ambos ejes.

La solución mecánica implementada para este ajuste radial en estas lentes consiste un doble anillo sobre el que la lente se encuentra montada (para L2, en la Imagen 5-31 se puede ver en verde y rojo en la parte trasera de la lente) que permiten mover la lente en X e Y (en esta Imagen 5-39 son los anillos verde y rojo). El barril dispone de cuatro agujeros roscados situados a 90° que permiten mover radialmente la lente usando sendos tornillos (Imagen 5-40). Una vez ajustada la lente, ésta se fija apretando los tornillos de montaje del conjunto de la lente al barril.

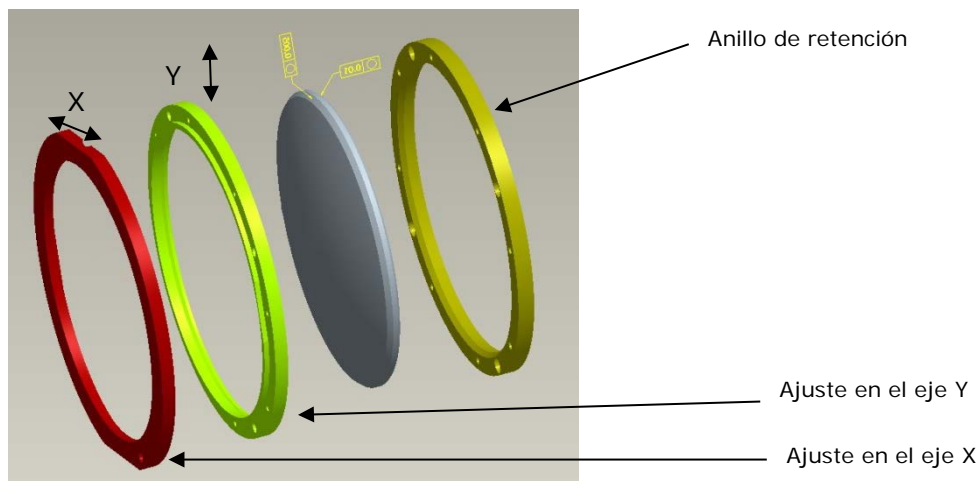


Imagen 5-39: Diseño mecánico del compensador de descentrado de L2.



Imagen 5-40: Tornillos de ajuste de descentrado de L6 en el barril LM3.

Con el barril montado, se ajustan entonces los tornillos mediante la medición de la posición radial de L2, usando de nuevo un micrómetro de profundidad, hasta conseguir el mejor alineado, dentro de las $50 \mu\text{m}$ de descentrado permitidas por el análisis de errores.

Luego se realiza un interferograma del conjunto del barril en configuración de doble paso para determinar que las aberraciones no simétricas son mínimas.

Para ello, usando *Zemax* se simula dicha configuración en doble paso para determinar el $F\#$ con el que se ha de iluminar el barril y qué elemento es necesario para devolver el haz en doble paso. Así, el barril LM2 puede ser testado en una configuración focal-focal, iluminando con un $F\#=7.5$ y usando una superficie esférica para el retorno del haz al interferómetro. En cambio, el barril LM3 permite una configuración focal-afocal, en la que la iluminación es más rápida, un $F\#=1.5$, y la devolución del haz con un espejo plano.

En la Imagen 5-41 se muestra la configuración experimental propuesta para la verificación del barril LM2, y en la Imagen 5-42 para el barril LM3. Con ayuda de un interferómetro (E.3) con la correspondiente esfera de transmisión; de material auxiliar de laboratorio, como son la esfera y el espejo plano de retorno; y monturas diseñadas por el equipo de mecánicos y fabricadas en el MPIA, se montan ambos dispositivos.

Como ejemplo, se muestra LM3 durante la medida en laboratorio (Imagen 5-43), y el resultado de la verificación del barril LM2 (Imagen 5-44).

Con la verificación de este alineado, se terminan de apretar los tornillos que fijan la lente con compensador dentro del barril, y ambos barriles quedan preparados para el siguiente nivel del AIV, el alineado de todas las estructuras ópticas al eje opto-mecánico (5.2.5).

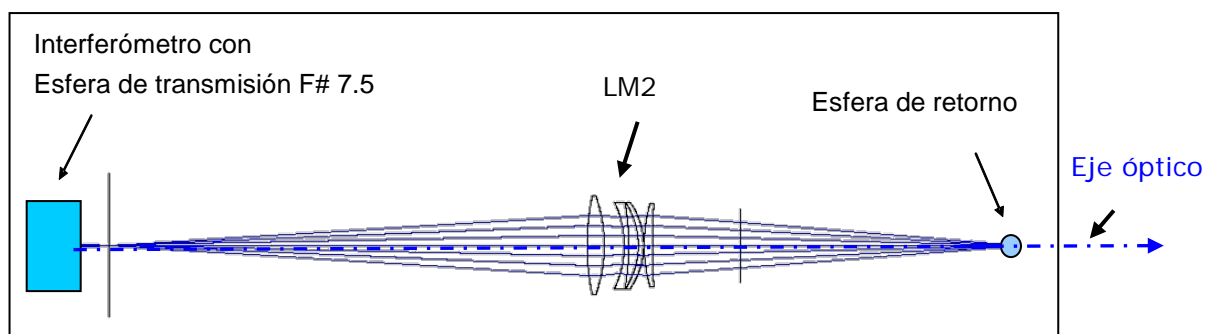


Imagen 5-41: Esquema del dispositivo experimental para la verificación interferencial del barril LM2.

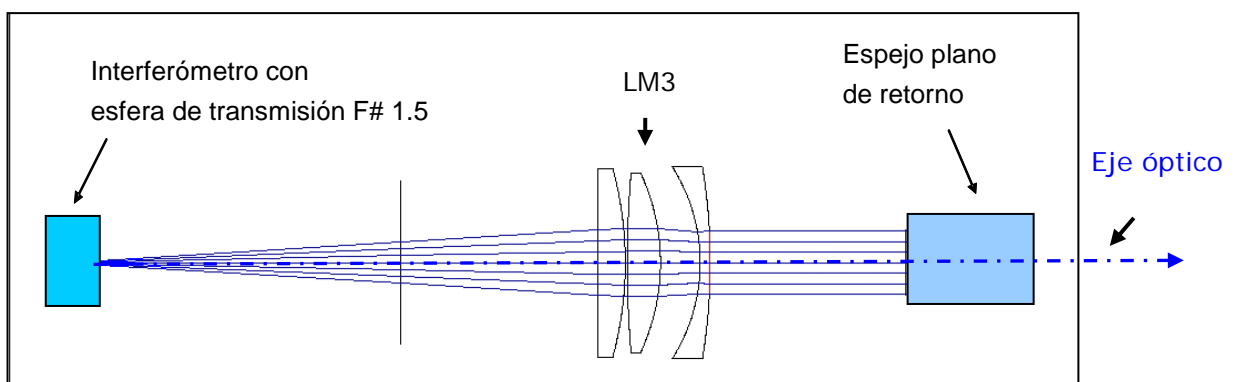


Imagen 5-42: Esquema del dispositivo experimental para la verificación interferencial del barril LM3.

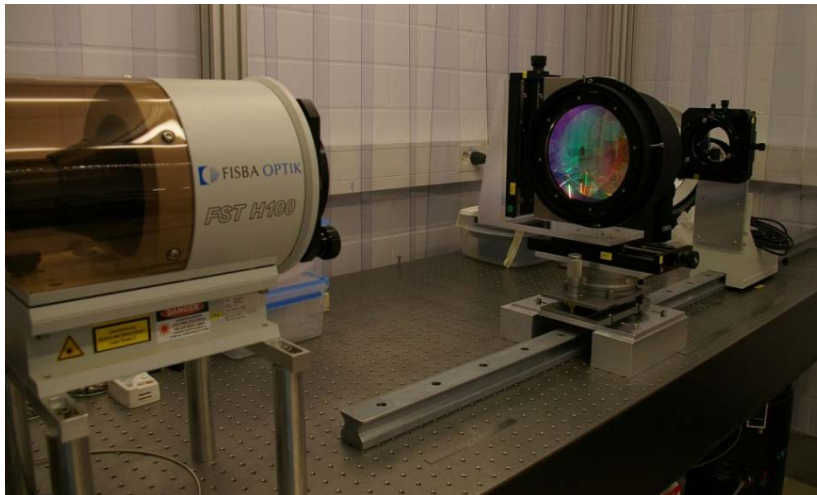


Imagen 5-43: Montaje experimental de la verificación interferencial de LM3 en doble paso.

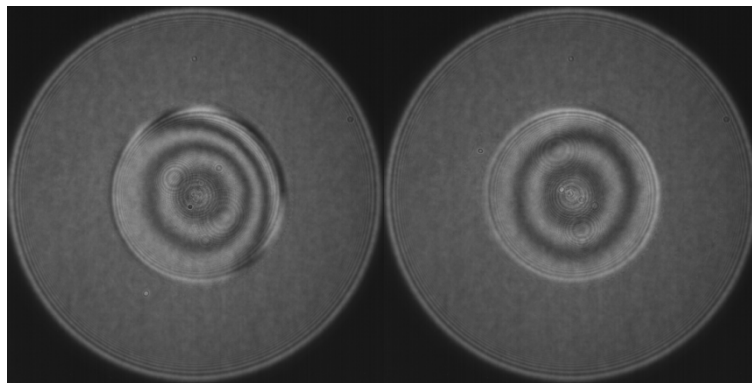


Imagen 5-44: Interferograma en doble paso de LM2. Izqda.: L2 desalineada. Dcha.: L2 centrada con un residuo menor que $50 \mu\text{m}$

5.2.4. EJE OPTO-MECÁNICO

El criostato de PANIC se instaló en el laboratorio montado en su carrito auxiliar (rojo en las imágenes siguientes) que permite la rotación del instrumento entre dos posiciones esenciales:

- la posición de operación de PANIC en telescopio, Imagen 5-45 a) y
- la posición de AIV, Imagen 5-45 b).

La integración y ajuste de la óptica se realiza en su posición de AIV y todas las medidas y verificaciones, tanto del alineado como de la calidad óptica del sistema se realizan en la posición de operación en telescopio.

Durante el AIV en laboratorio también se instala el adaptador a telescopio (TA, del inglés *Telescope Adapter*) real de PANIC que se usará durante operación en ambos telescopios. Este adaptador es de fibra de carbono y es la pieza negra sobre el criostato amarillo.

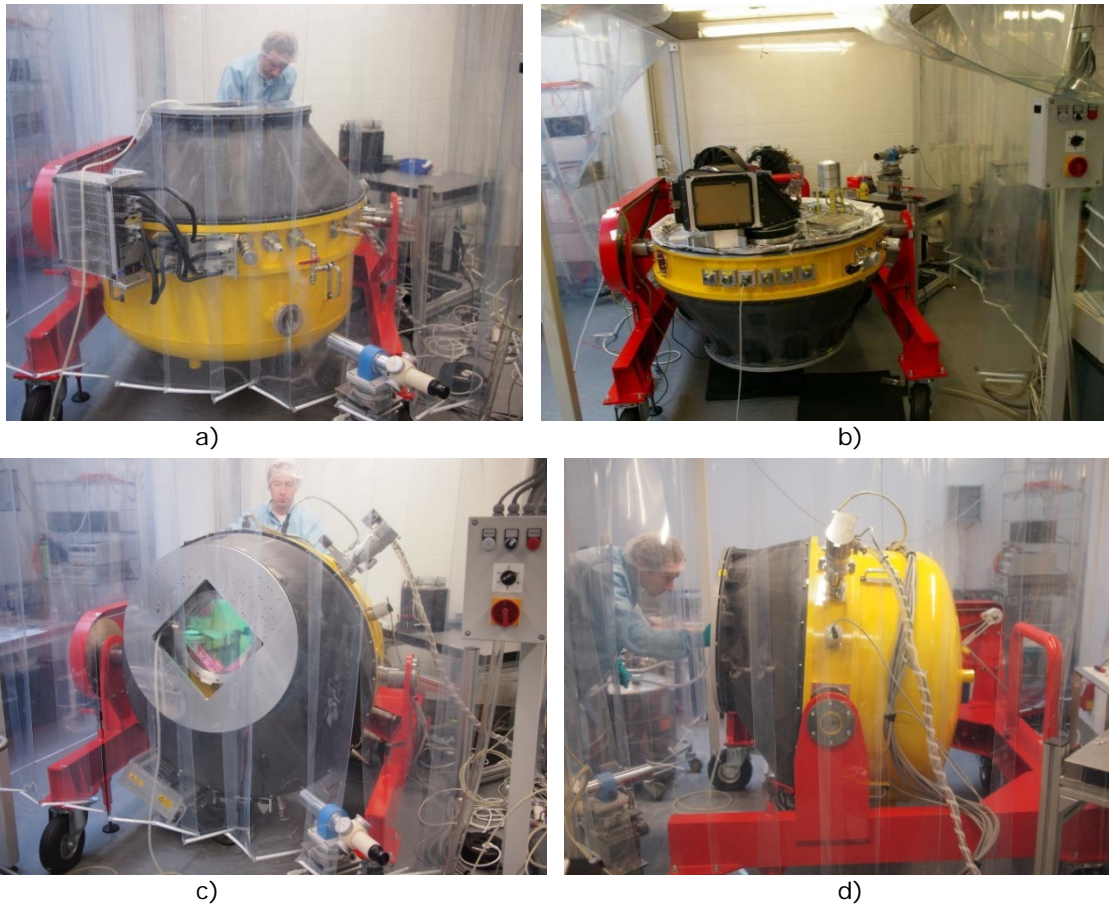


Imagen 5-45: Vista de PANIC montada en su carrito auxiliar de laboratorio: a) posición de operación, b) posición de AIV, c) rotando entre ambas posiciones, y d) a 90 °.

El establecimiento del eje opto-mecánico del instrumento es el primer paso para poder integrar los distintos subsistemas en el banco óptico de PANIC.

Según el plan de AIV presentado en FDR de la Óptica, el eje óptico se define por medio de las dos dianas lineales directamente atornilladas al banco óptico, denominadas **T1** y **T2**, que se encuentran localizadas en el espacio entre LM2 y el detector (Imagen 5-46) y se utilizan como referencia absoluta del eje opto-mecánico del instrumento durante su integración en el laboratorio, tanto en caliente como en frío.

Éstas están fabricadas en aluminio y tienen dos “dedos” cuyos bordes han sido fabricados con gran precisión (Imagen 5-47) tal que la altura del eje opto-mecánico, **L**, a temperatura ambiente es de $(206.364 \pm 10) \mu\text{m}$ (Imagen 5-25 e Imagen 5-24) y la correspondiente altura en criogenia, **L'**, es 205.598 mm (ecuación [C.3]).

Con el objetivo de posicionar los distintos subsistemas ópticos en su posición X/Y e inclinaciónX/inclinaciónY en el eje opto-mecánico establecido por las dianas T1 y T2, se establecen más dianas (Imagen 5-48, Tabla 5–7) localizadas en las estructuras principales, como se explicará en la siguiente sección 5.2.5). Todas las dianas han sido diseñadas y fabricadas *ad hoc* para PANIC (ver sección Sistemas Auxiliares, 5.1.5.).

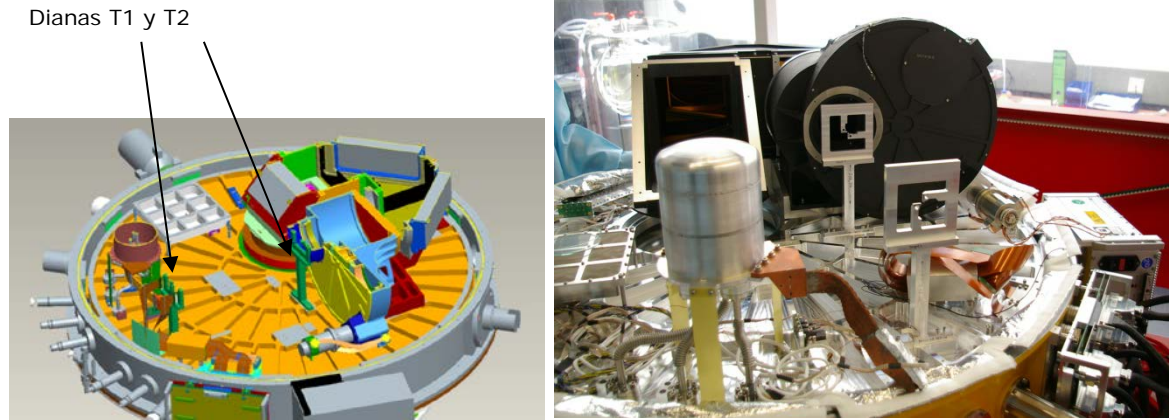


Imagen 5-46: Vista de las dos dianas, T1 y T2, instaladas en el banco óptico de PANIC. La estructura de espejos y la rueda de diafragmas de apertura se encuentran también instaladas.

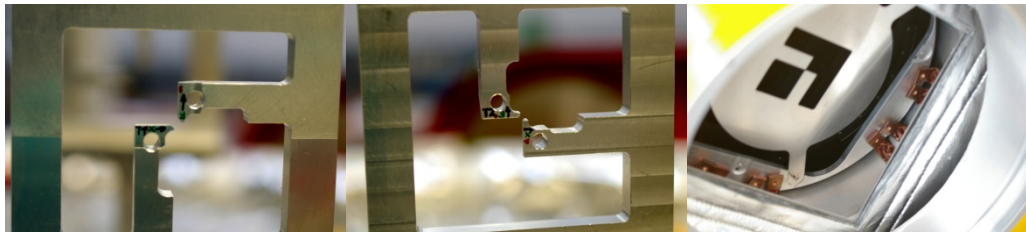


Imagen 5-47: De izqda. a dcha.: dianas principales, T1 y T2, y diana TB2 situada en el baffle entre la ventana de entrada y L1.

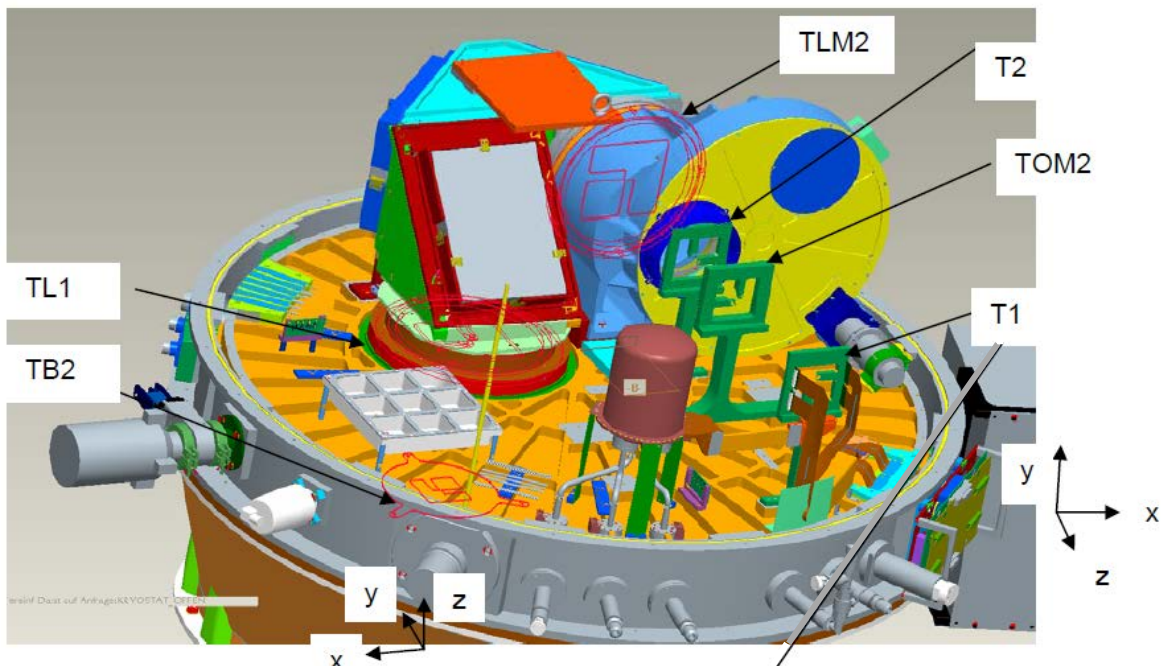


Imagen 5-48: Esquema mecánico de cuáles son las dianas usadas durante el alineado del instrumento y dónde se encuentran instaladas.

El alineado de los subsistemas se realiza midiendo y ajustando las posiciones X e Y, y la inclinación X e inclinación Y de la correspondiente diana con respecto al eje opto-mecánico de referencia definido por las dianas T1 y T2. Para realizar estas medidas se utiliza un MAT (ver apartado E.4) instalado en una mesa óptica auxiliar externa al instrumento (Imagen 5-49) y en un sistema de plataformas de posicionamiento que dispone de movimientos en

cuatro grados de libertad (X, Y, inclinación X e inclinación Y) y que permite coalinearlos con el eje determinado por las dianas de referencia.

Este aparato óptico es un telescopio con un rango de enfoque desde 25 mm a infinito, que puede ser usado en dos modos de operación, imagen directa y autocolimación. En imagen directa permite medir la posición X e Y de la diana con una precisión del orden de micras que depende de la distancia de la diana al telescopio (ecuación ([5.1])). En concreto, en nuestro dispositivo experimental, las posiciones de centrado de las dianas T1 y T2 se determinan con un error menor a 17 y 23 μm respectivamente. En autocolimación permite medir pequeñas inclinaciones de la superficie espejada con una precisión de segundos de arco (ecuación [5.2]).

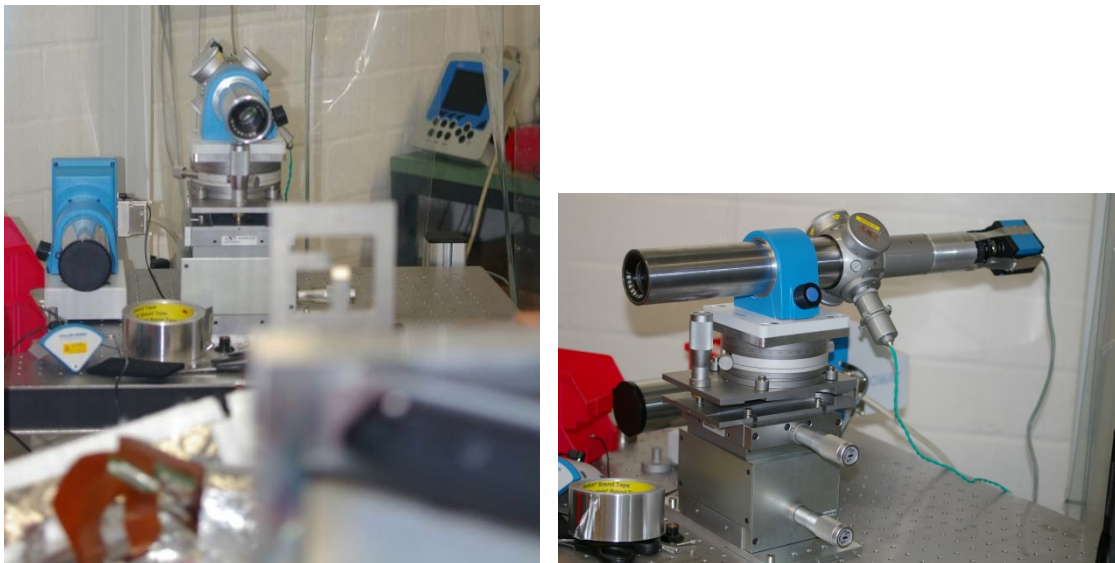


Imagen 5-49: Vista del MAT desde la estructura de espejos. MAT montado en las cuatro etapas de ajuste.

El proceso completo de alineado y caracterización del eje opto-mecánico del instrumento se extiende desde mayo de 2011 a junio de 2012.

El primer paso de este alineado es establecer un eje de referencia del eje opto-mecánico del instrumento. Para ello se instala y ajusta el MAT en la línea de visión de las dos dianas de referencia, con una precisión mejor que 25 μm para nuestra configuración en laboratorio. En este momento ningún elemento óptico está instalado, pero sí la OM1 que en este punto del alineado tan solo contiene la estructura de espejos (la cuál previamente ha sido alineada a nivel de subsistema (5.2.1)). El ajuste se realiza de forma iterativa, enfocando el MAT a una y otra diana y usando las cuatro plataformas de posicionamiento en las que se encuentra montado. Una vez coalineado, éste se deja fijo y se utilizan sus tornillos micrométricos para medir la posición de otras dianas con respecto a las de referencia.

El segundo paso es extender el eje opto-mecánico del instrumento más allá de la estructura de los espejos hacia la ventana de entrada y obtener otro punto del eje en la posición de la lente L1.

Es necesario una nueva diana, TB2, y ajustar la OM1 que incluye la MS (en posición X/Y/rotaciónX/rotaciónY/rotaciónZ). De momento Z se deja libre hasta que se instalen los componentes ópticos con potencia.

La OM1 (Imagen 5-48) tiene fijados por diseño mecánico Y/rotación Z, y se puede ajustar en X/ Z/rotación Y, mediante desplazamiento coplanario al banco óptico y perpendicular al eje óptico con ayuda de unos tornillos micrométricos que desplazan dicha estructura. Para el ajuste en Y/rotación Z es necesario la remecanización o bien el galgado (según haya que bajar o subir) dicha estructura de sus tres puntos de apoyo al banco óptico. Una vez alcanzado el alineado deseado se fija su posición por tres pernos de posicionamiento. Éstos son unos pequeños cilindros de acero fabricados con gran precisión y que se alojan en su correspondiente posición en el banco óptico en agujeros cilíndricos, también de gran precisión, de tal forma que aseguran la repetitividad de la interfaz en cuestión.

Se instala otra diana, TB2 (Imagen 5-47, dcha.), en la posición del baffle de esta lente cuyo eje está coalineado con el principal T1-T2.

Ahora se ajusta la posición X e Y de la OM1 (que tiene estos grados de ajuste con respecto al banco óptico) con ayuda de dicha diana hasta que el eje mecánico que define la diana esté coalineado con T1-T2.

Por otro lado, para el ajuste de inclinación se instala el espejo auxiliar (Imagen 5-29) en el puerto de salida de la estructura de espejos (Imagen 5-50). Por iteraciones entre posición e inclinación se consigue alinear esta OM1 hasta que está dentro de su rango de tolerancias.

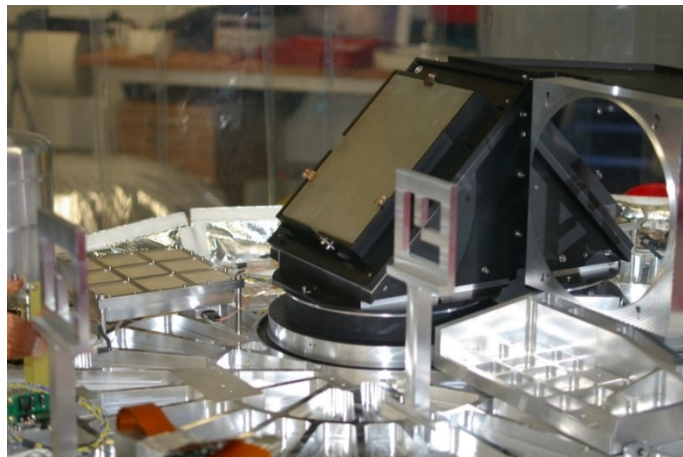


Imagen 5-50: Vista de las dos dianas, T1 y T2, instaladas en el banco óptico de PANIC y del espejo auxiliar instalado en el puerto de salida de la estructura de espejos.

De esta forma queda establecido el eje opto-mecánico del instrumento a temperatura ambiente desde la posición del detector a la L1 por la línea que pasa por T1-T2-TB2.

Una vez establecido este eje se puede caracterizar, para ello se realizan dos tipos de medidas:

1. medición del eje opto-mecánico a temperatura de trabajo y
2. determinación de las posibles flexiones del instrumento a temperatura ambiente.

Con respecto al primero, se comienza con la comprobación de que es posible medir el eje opto-mecánico en frío. Para ello, como se ha mencionado, el primer ciclado criogénico del instrumento con componentes ópticos tiene lugar en diciembre de 2010, en el cual se cicla por primera vez las ventanas de entrada y de salida del criostato, la estructura de los espejos y, además se aprovecha para realizar dicha comprobación. La Imagen 5-51 corresponde a estas pruebas. En ellas también se encuentra instalada la diana del TA, denominada TTA.

Durante el año 2011 se realizan varios ciclados criogénicos para medir el eje opto-mecánico en caliente y en frío sucesivamente para confirmar su repetitividad después de cada ciclado criogénico y ajustar OM1 y la TTA.



Imagen 5-51: a) y c) Midiendo el eje opto-mecánico en frío a través de la ventana auxiliar de salida con PANIC en posición de operación. b) visual de las dianas vistas a través de la ventana auxiliar de salida.

Con respecto al segundo, las posibles flexiones del banco óptico a temperatura ambiente conllevan la medida del eje opto-mecánico al variar el ángulo de operación del instrumento hasta un máximo de 60° (con respecto al cénit), por medio de la medida de los desplazamientos de las dianas localizadas en la entrada del instrumento, TL1 (localizada en el lugar de la LM1), con respecto al eje determinado en horizontal por T1. PANIC es rotada en su carrito auxiliar de laboratorio (Imagen 5-45 c)). Para estas pruebas se usa un pequeño sensor sensible a láser rojo acoplado en T1 y se ilumina con un láser de diodo acoplado a TL1.

El máximo desplazamiento medido en caliente se muestra en la Tabla 5-6, cuando no hay ninguna óptica instalada, excepto los espejos como ya se ha mencionado. Las flexiones están dentro del rango esperado según los análisis de elementos finitos realizados en el modelo mecánico.

Con posterioridad, cuando toda la óptica se encuentra integrada, incluyendo el mosaico de detectores, el valor de estas flexiones ha sido verificado en frío en laboratorio, midiendo el desplazamiento de la imagen en el detector de PANIC y usando como objeto una estrella artificial (producida por el SS) en el plano focal del telescopio (Dorner & Cárdenas Vázquez, PANIC Star Simulator test report, 2015, September). La misma Tabla 5–6 recoge los valores máximos registrados en esta prueba.

La magnificación lateral entre estos dos planos focales es 0.4676 (ver Tabla 6–2), por tanto, aplicando a los valores medidos sin óptica instalada esta magnificación se obtiene valores que se corresponden completamente con las medidas en frío.

También se verifica en estas pruebas que el impacto en la calidad de imagen es despreciable. El único efecto en la imagen es el desplazamiento observado. Este desplazamiento no afecta al modo de observación en el NIR ya que las imágenes son adquiridas con el método de observación "*dithering*" (exposiciones relativamente cortas entre las que se realiza un pequeño movimiento del campo de visión). En el infrarrojo cercano, dado el alto nivel de fondo de cielo, esta técnica de observación es obligatoria. En todo caso, si es necesario, es un efecto que se puede corregir por software.

Diana	Desplazamiento máx. (μm)		Banco óptico
	X	Y	
TL1	130 ± 70	500 ± 70	Sin elementos ópticos con potencia
TL1	~ 80	~ 210	Con toda la óptica integrada (máx. 5px en X, y 12 px en Y)

Tabla 5–6: Caracterización de las flexiones del banco óptico de PANIC.

5.2.5. ALINEADO DEL INSTRUMENTO COMPLETO

El alineado de los subsistemas puede realizarse llegado este punto del AIV. Por un lado, el eje opto-mecánico del instrumento está establecido (5.2.4), desde la diana T1 a la localizada más allá de la estructura de los espejos, la TB2, y caracterizado. Y por otro lado, los diversos subsistemas se encuentran ya integrados (5.2.3), L1, MS, LM2, LM3, LM4 y FW.

Se establecen más dianas (Imagen 5-48, Tabla 5–7) localizadas en las estructuras principales, con el objeto de poder ajustar la correspondiente estructura hasta coalinearla con T1-T2 dentro de rango establecido en las tolerancias del sistema.

Esta fase comienza, propiamente dicho, en noviembre de 2012, y por diversas causas (entre ellas, políticas y técnicas) se prolonga hasta febrero de 2014. En las políticas, tan solo destacar la imposibilidad de asignación de tiempo de ingeniería al proyecto en el MPIA, lo que causó ciertos retrasos. En las técnicas, se pueden destacar tres:

- a) El tiempo necesario para cada ciclado criogénico.

Para cada medida en frío es necesario cerrar el criostato, que incluye la pantalla de radiación interna (denominada *Radiation Shield*) y conexión de toda la electrónica, hacer vacío, criogenizar con nitrógeno líquido para enfriar el instrumento, y luego esperar hasta que todo el instrumento llega a la temperatura de trabajo. Este proceso consume al menos una semana de tiempo.

Luego se realizaban las medidas necesarias en frío, por los días que fueran necesarios, según las pruebas previstas. Al principio, menos días, y conforme el banco óptico estuvo más poblado y se llegaba a más detalle, el tiempo para medidas requería más días.

Por último se procedía al proceso inverso, calentar el instrumento hasta temperatura ambiente, ventear, y luego abrir el criostato, consumiendo otra semana.

En conclusión, cada ciclado criogénico consumía en torno a tres-cuatro semanas. En este contexto, decir que había que planear bien lo que se quería medir en frío y qué pruebas a realizar y aprovechar el tiempo de calentamiento para hacer cálculos y determinar las acciones a realizar en caliente.

b) Las pruebas realizadas para el alineado de la OM1 y la MS revelaron que había un desalineamiento que no podía ser identificado.

Así en junio de 2013 se amplió el plan de AIV (Huber & Bizenberger, PANIC Optical alignment and verification concept, 2013, June) para medir también inclinaciones de las estructuras que se habían definido en principio por fabricación. Así nace el espejo auxiliar, denominado MLM2 (sección 5.1.5.2), el sistema de ajuste a telescopio (que veremos más adelante en sección 5.3.2). También se define el diseño preliminar de la máscara de foco (5.1.5.4).

c) En la etapa final del alineado, en noviembre de 2013, se descubrió el problema del anillo de aluminio de los filtros que provocó la rotura del filtro K_s tras un ciclo criogénico.

El análisis del problema y la solución de retirar dicho anillo, añade varios meses de retraso al proyecto.

El alineado y ajuste de todos los subsistemas se realiza midiendo y ajustando las posiciones X/Y e inclinaciónX/inclinaciónY de las correspondientes dianas (Imagen 5-48 y Tabla 5-7) con respecto al eje opto-mecánico de referencia definido por las dianas T1 y T2. Para todas estas medidas se utiliza el MAT, en la configuración de laboratorio con el banco óptico de PANIC en posición de AIV y el MAT detrás de la posición del detector en la línea de visión de las dianas T1-T2, según se muestra en la sección anterior (Imagen 5-49 o Imagen 5-45, c). El alineado de las diferentes dianas se hace mediante el MAT en su modo de visión directa para medir desplazamientos en X/Y. Para las medidas de ángulos de inclinación, se usa el MAT en autocolimación junto con los espejos de aluminio auxiliares (5.1.5.2) instalados en las correspondientes estructuras. En la Tabla 5-7 se listan las dianas utilizadas, su localización y el error de la medida que se obtiene en la configuración de laboratorio. Los errores han sido calculados usando la ecuación ([5.1]) para medidas X/Y, y la ecuación ([5.2]) para los ángulos.

El diseño de las dianas es tal que todas pueden ser vistas a través de la línea de visión sin bloquear el eje óptico y apenas bloquear luz, con lo que pueden coexistir durante las medidas de los distintos subsistemas (ejemplos en Imagen 5-52 e Imagen 5-53).

Diana	Localización	Distancia al MAT (mm)	X/Y error (μm)	Inclinación X/ Inclinación Y, error (arcsec)
T1	Posición detector	739.0	17	--
TOM2	Posición OM2	1004.1	21	--
TLM3	Puerto entrada LM3	1088.0	22	47
T2	Puerto salida OM1	1135.8	23	--
TLM2	Puerto entrada LM2	1378.8	26	37
Espejo auxiliar	Puerto salida MS	1500.0	28	34
TL1	Posición de L1	2256.0	39	23
TB2	Posición inicio bafle B2	2515.5	43	--

Tabla 5–7: Localización de las dianas mecánicas usadas durante el alineado del instrumento y precisión de la medida en X/Y que se puede obtener con el MAT en nuestra configuración de laboratorio.

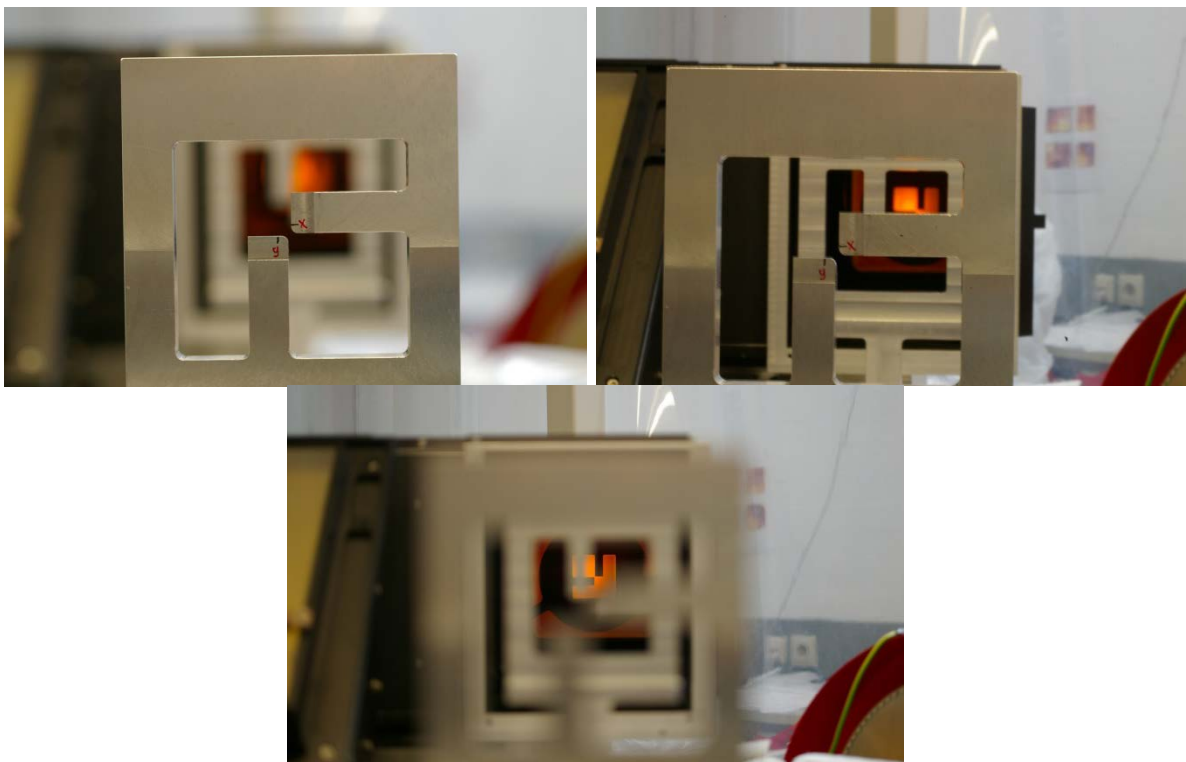


Imagen 5-52: Línea de visión del MAT de las dianas T1, T2 y TB2.

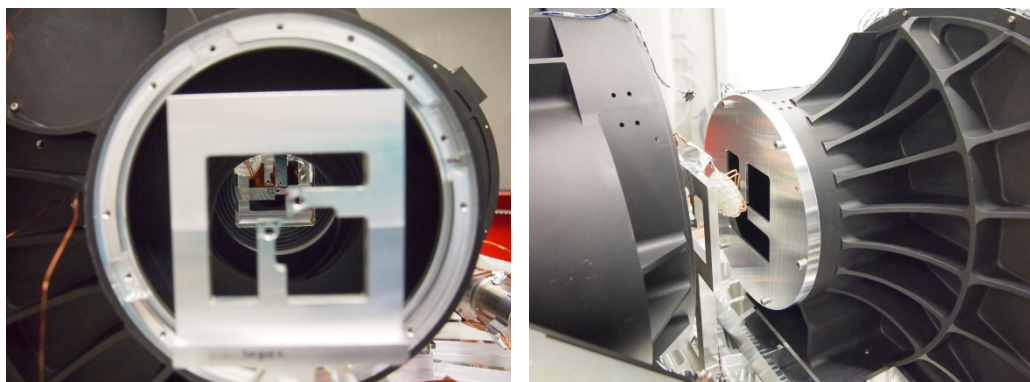


Imagen 5-53: Izqda.: Línea de visión del MAT de las dianas T1, TLM2 y T2. Dcha.: Foto de las TLM2 y T2, y la luz de iluminación para TLM2.

Los subsistemas OM1 y OM2 se integran en el banco óptico sin óptica dentro (en OM1, sin LM2, y en OM2, sin LM3 ni LM4). La OM1 sí tiene integrada la estructura de espejos. Tampoco se encuentra instalado el detector de PANIC.

Ambas estructuras principales se alinean en caliente con el banco óptico en posición de AIV (Imagen 5-45, b)) y posteriormente las medidas de verificación se realizan en frío y en posición cenital (Imagen 5-45, a)) a través de la ventana de salida (Imagen 5-51). Después, las correcciones se introducen en caliente con el banco óptico en posición de AIV de nuevo.

Las correcciones son realizadas por dos procesos, según la interfaz que corresponda. Los procesos de ajuste previstos en el diseño mecánico son: bien por remecanizado de la interfaz o bien inserción de galgas en la interfaz definida correspondiente. Como ejemplo se muestra la interfaz entre LM2 y la OM1 que la alberga (Imagen 5-54), donde se puede apreciar las galgas finalmente implementadas en los puntos A ($350\ \mu\text{m}$), B ($350\ \mu\text{m}$), C ($300\ \mu\text{m}$) y E ($200\ \mu\text{m}$).

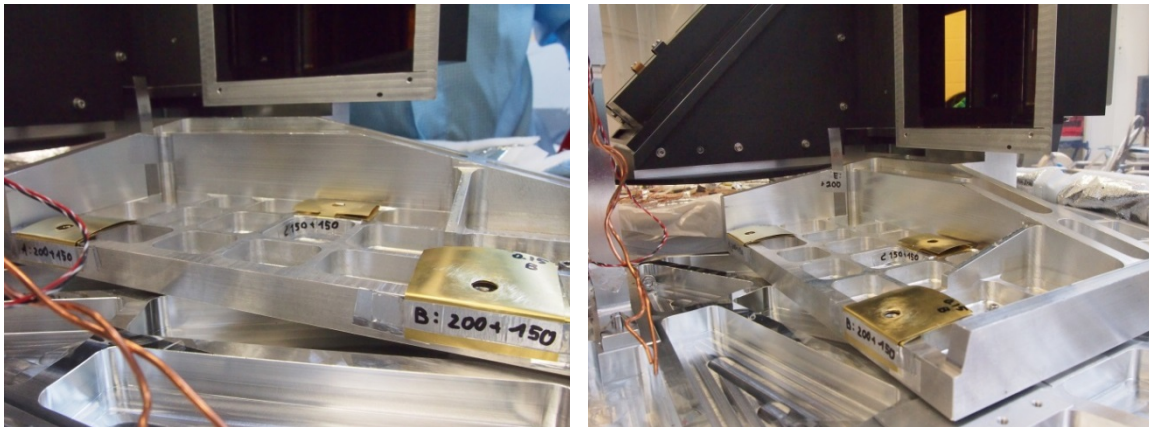


Imagen 5-54: Ejemplo de galgado: galgas introducidas en la interfaz entre la OM1 y el banco óptico de PANIC.

En resumen, cada iteración de medida y ajuste requiere, por tanto, un período mínimo de cuatro semanas: mediciones y ajustes en caliente, preparar y cerrar el criostato para enfriar, enfriamiento del instrumento hasta su temperatura criogénica, realización de las medidas de las distintas targets en frío, análisis de los datos y decisión de las acciones correctivas a aplicar, calentar el instrumento, abrir, aplicar las medidas correctivas, y de nuevo se repite el proceso. El proceso completo de alineado de esta etapa conllevó nueve iteraciones.

Finalmente los elementos se encuentran en un eje común con un error del orden de **100–50 μm** y **1–1,5 arcmin**, quedando el alineado de la estructura dentro de las tolerancias asignadas en el presupuesto final de errores. Además se verifica en laboratorio la repetitividad de los distintos elementos dentro de estos márgenes, incluyendo los efectos térmicos y de gravedad. El proceso y los resultados de este alineado quedan recogidos en la publicación realizada en el congreso SPIE sobre telescopios e instrumentación relacionada (Dorner, et al., 2014). En una nota técnica interna (Dorner, Opto-mechanical alignment sequence, 2015) se detalla de la secuencia seguida durante este alineado.

Una vez alineados los distintos subsistemas, se montan los barriles ópticos dentro de su correspondiente estructura. Así, durante marzo de 2014, se retiran del banco óptico de

PANIC las dianas de alineado y se integran los dos barriles ópticos: LM1 y LM2 (dentro de OM1) y LM3 y LM4 (dentro de OM2). También la estructura de la FW con la PIL y el filtro K_S dañado. El filtro no estaba apto para uso científico pero sí para las pruebas de laboratorio. La FW será completamente poblada tras la recepción de los filtros con el anillo retirado en agosto de 2014.

El instrumento queda preparado para el siguiente paso de su AIV.

5.2.6. AJUSTE DEL MOSAICO DE DETECTORES

La siguiente etapa del alineado es la integración y ajuste del detector de PANIC, que tiene lugar entre los meses de marzo y julio de 2014.

Como ya se ha mencionado, PANIC no tiene mecanismo de ajuste de foco y por tanto, el mosaico de detectores ha de ser alineado en tres grados de libertad: su posición en el eje Z e inclinación en X e Y. El posicionado lateral X/Y del detector viene dado por la precisión de la interfaz fabricada, en este caso ± 0.2 mm.

La configuración experimental es la siguiente:

- Toda la óptica de PANIC se encuentra integrada y el instrumento alineado.
- Se instala la máscara de foco (Imagen 5-55 máscara construida) en la posición del foco del telescopio, esto es en la posición del diafragma de campo frío de PANIC (Imagen 5-56).
- Se coloca un anillo en la interfaz entre LM4 y la FPA (mosaico de detectores). En la Imagen 5-57 se muestra dicho anillo y su plano de fabricación. En la Imagen 5-58 se observa dicho anillo colocado en la interfaz referida.
- Se instala el mosaico de detectores en su posición nominal dada por el modelo óptico construido (Imagen 5-59).
- Se instala una pantalla difusora blanca en la ventana de entrada del criostato.
- Se retira la ventana de salida auxiliar del criostato y se cierra con una tapa ciega.
- Con PANIC a temperatura de trabajo y en posición de operación en telescopio, se ilumina dicha pantalla desde el exterior con luz halógena de forma que la imagen de la máscara de foco en el detector tenga buena señal.
- Se toman tres tipos de imágenes:
 - o *Flat*: Imágenes con la lámpara halógena de 60 W a 120 V, no difusor en la EW, un filtro H instalado en la rueda de filtros y tiempo de exposición 50 s.
 - o *Dark*: Imágenes con la posición cerrada (blank) en la rueda de filtros y de tiempo de exposición 1.5 s.
 - o Imágenes de máscara de foco: Tomadas con la lámpara halógena de 15 W a 50 V, con difusor en la EW, el filtro KS en las ruedas de filtros y tiempo de exposición 1.5 s.

Recordemos que la máscara de foco (sección 5.1.5.4) contiene varios patrones de agujeros de 0.3 mm de diámetro, que según el modelo óptico construido, producirán imágenes en el detector de **7.8 px**. Usando la ecuación [3.6] y la magnificación del modelo construido (Tabla 6–2):

$$y' = 0.4676 \cdot 0.3 = 140 \mu\text{m} = 7.8 \text{ px} \quad [5.1]$$

El patrón de aperturas a la distancia Z del foco nominal es un círculo de diámetro 123.2 mm (ver plano de fabricación Imagen 5-26). La distribución del resto de aperturas cubre todo el plano focal (en la Imagen 5-55 se aprecia el reparto por igual en los cuatro cuadrantes). Como ya se mencionó en la sección 5.1.5.4, cada cuadrante contiene cuatro juegos de agujeros, dos localizados antes, y dos después del plano focal nominal, a las distancias de -2 , -1 , 0 , $+1$ y $+2$ mm. Por tanto, las imágenes de los agujeritos en el detector se encuentran diferentemente enfocadas. Del análisis de los tamaños de las imágenes se puede deducir el estado de posición en Z e inclinación de los detectores con respecto a la posición ideal.

Dichos juegos de agujeros se han dispuesto en la intersección de la esfera del plano focal del telescopio con el círculo de agujeros de diámetro 123.2 mm, localizados en foco nominal. Debido a la curvatura del plano focal del telescopio se determina que la posición media en el eje Z que corresponde a cada juego, resultando entonces en que los patrones se encuentran localizados a: -2.46 , 0.83 , $+0.78$ y $+2.37$ mm. Éstos son los valores que se usarán en el ajuste del foco (Imagen 5-61).

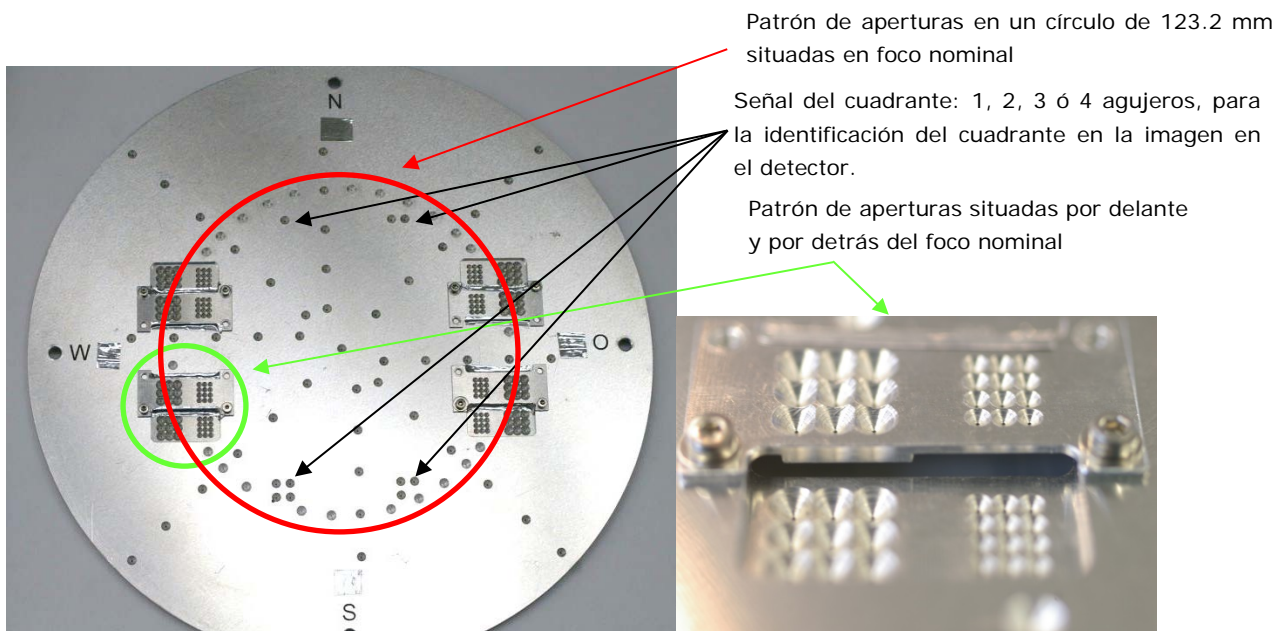


Imagen 5-55: Izqda.: Imagen de la máscara de foco fabricada. Dcha.: Detalle de uno de los patrones de agujeros a distintas distancias de foco.

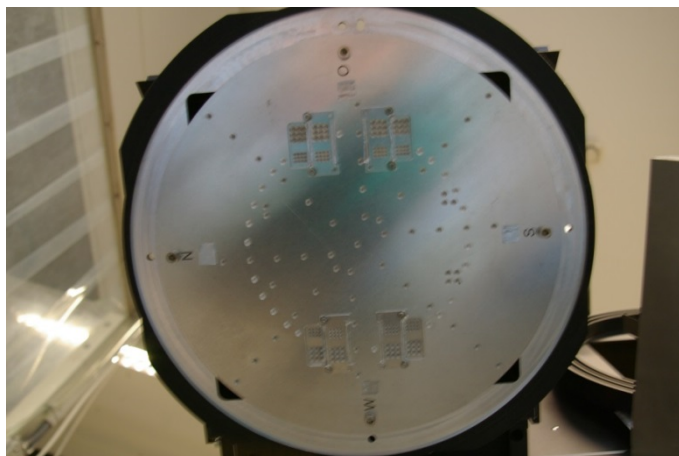


Imagen 5-56: Máscara de foco instalada en la posición física del diafragma de campo, en la OM1.

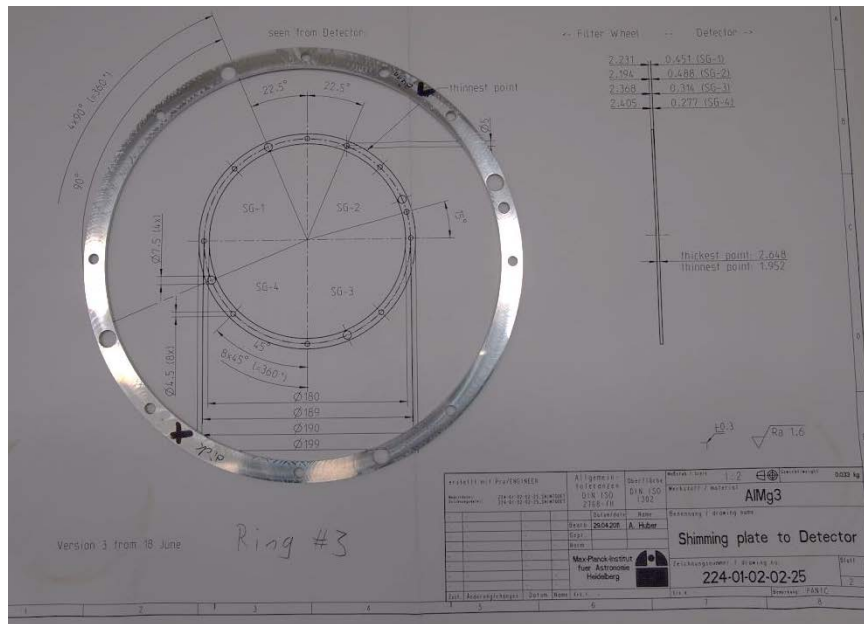


Imagen 5-57: Anillo remecanizable que se instala en la interfaz del ajuste del detector.

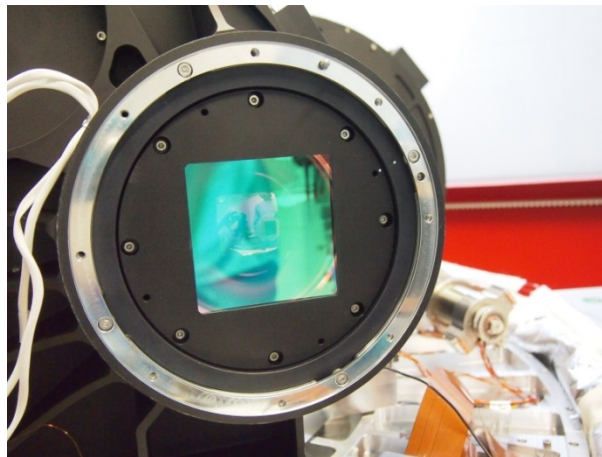


Imagen 5-58: Interfaz entre el puerto de salida de LM4 y la FPA. El anillo remecanizable se encuentra instalado.

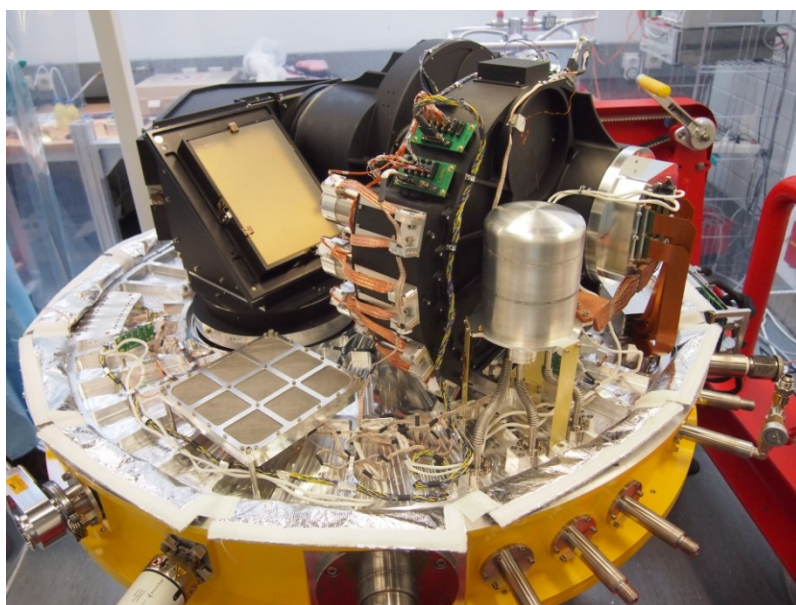


Imagen 5-59: Banco óptico de PANIC con toda la óptica y los detectores instalados. La luz entra desde abajo, por la ventana de entrada.

El procedimiento que usamos para este ajuste se resumió en la publicación (Dorner, et al., 2014). A continuación se listan los pasos principales seguidos:

- Se mide el tamaño de las imágenes de los agujeros en términos del FWHM de un ajuste gaussiano.

En la Imagen 5-60 se presenta una imagen de la máscara de foco, la cual es combinación de 6 exposiciones (de 1.5 s cada una) corregidas de *flat* y de *dark*. Los agujeros usados están marcados con cuadrados rojos.

- Se hace la media de los valores dentro de cada conjunto marcado con la línea azul, de forma que por cada cuadrante se obtienen 5 puntos.
- Se realiza un ajuste parabólico a esos puntos, y se calcula el mínimo de dicha parábola (Imagen 5-61).
- Cada mínimo determinado corresponde al Δz en la posición del plano focal de ese cuadrante.

Mediante la ecuación [3.8] se puede trasladar a su conjugado, $\Delta z'$, en el plano focal del detector:

$$\Delta z' = m^2 \cdot \Delta z \quad [5.2]$$

- Para el posicionado en Z, se busca la mejor posición conjugada del foco del telescopio con la información del desenfoque $\Delta z'$ para cada cuadrante.
- Se ajusta el mejor plano a todos los puntos para obtener la inclinación del plano óptimo.
- El ajuste del mosaico se realiza por remecanizado del anillo de interfaz el puerto de salida de LM4 y la FPA.

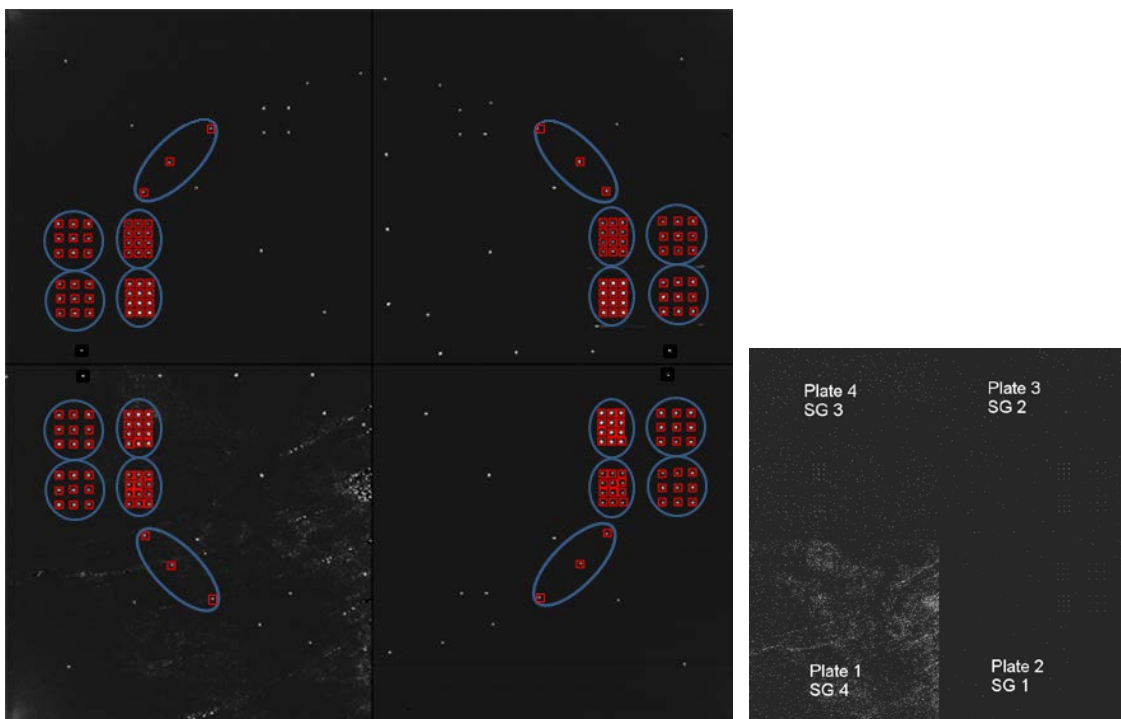


Imagen 5-60: Izqda.: Imagen de la máscara de foco en el detector de PANIC. Dcha.: configuración de los cuadrantes de la máscara con respecto a los detectores.

Cuatro ciclos criogénicos fueron necesarios para situar la FPA en su posición óptima dentro de tolerancias (Z -position *offset* menor a $50\ \mu\text{m}$ e inclinación X /inclinación Y menores a 2 arcmin). En esta posición óptima los agujeros localizados a $0\ \text{mm}$ en la máscara tienen un tamaño de $8.5\ \text{px}$ en el detector.

Para un error de la dimensión de los agujeros de $20\ \mu\text{m}$, y sabiendo que los $7.8\ \text{px}$ esperados por el modelo resultan en $8.5\ \text{px}$ experimentalmente, se puede acotar el error en magnificación de la cámara en este punto del AIV a: $m = 0.468 \pm 0.010$.

Se presenta en la Imagen 5-61 las curvas de los ajustes parabólicos para la determinación del *offset* en Z , correspondientes del primer ciclado y del ciclado cuarto y final que realizamos para este paso del AIV. Se puede observar cómo en el primer ciclado el detector se encontraba lejos de la posición óptima en Z , en particular alejado con respecto a la posición óptima.

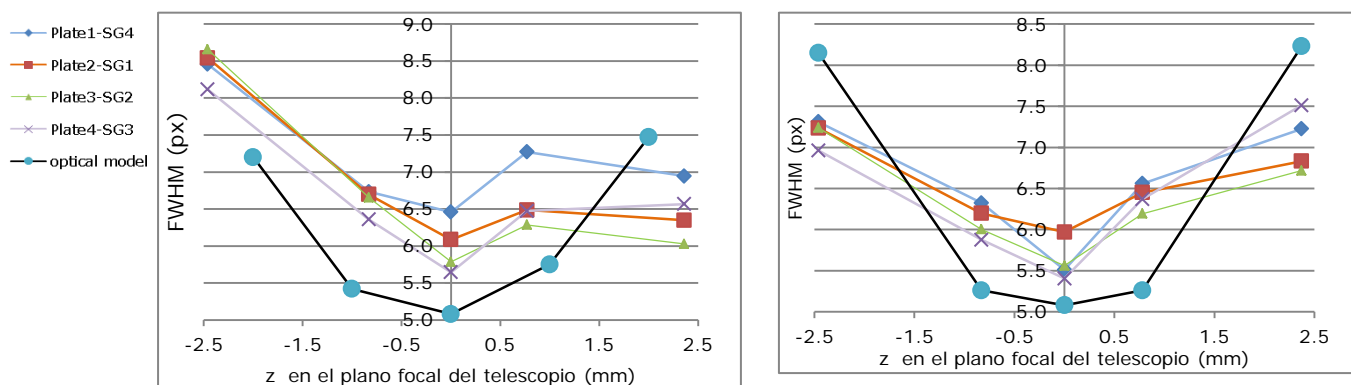


Imagen 5-61: Izqda.: Ajustes correspondiente al primer ciclado de ajuste del detector. Dcha: Idem correspondientes al cuarto y último ciclado realizado para este ajuste.

5.2.7. PRUEBAS FINALES DE LABORATORIO ANTES DE TRANSPORTE

La validación de ingeniería del sistema, que permite cualificarlo frente a las especificaciones científicas, se hace en base a su calidad óptica. En septiembre de 2014 se verifica la calidad óptica del instrumento completo con ayuda del SS de PANIC.

El diseño óptico detallado de este sistema auxiliar se presenta en el apéndice D, como ya se ha mencionado.

Para estas pruebas la configuración experimental es la siguiente:

- Toda la óptica de PANIC se encuentra integrada y el instrumento alineado, incluyendo el FPA.
- Se retira la máscara de foco y se instala el diafragma de campo.
- Se pueblan las ruedas de filtros con los filtros de ciencia recibidos sin anillo.
- Se cierra el criostato, se dispone PANIC en su posición de operación (cenital) y se enfría hasta su temperatura de trabajo.
- Se monta el TA.
- Se retira el difusor instalado en la ventana de entrada.

- Se instala sobre el TA la interfaz de aluminio para el posicionamiento del SS a lo largo y ancho del campo de visión (pieza con patrones de posicionamiento practicados, izqda. en Imagen 5-62).
- Se configura el SS a la distancia **A** (más detalle en el apéndice D, Tabla D-3) predicha por el modelo óptico, según la banda espectral y la posición 1, 2, 3 ó 4, a medir (explicado en más detalle en el apéndice D, sección D.1 y configuraciones iniciales en Tabla D-3).
En el SS se instala el diafragma de campo para $F\#=8$ (simulación para las condiciones del T22) por ser el caso más desfavorable.
- Se instala el SS delante de la ventana de entrada del criostato (dcha. en Imagen 5-62).
- Se tapa la entrada de la ventana con un bafle (cartulinas en Imagen 5-63, izqda.) y se apaga la luz del laboratorio para evitar la entrada de luces parásitas en el sistema.

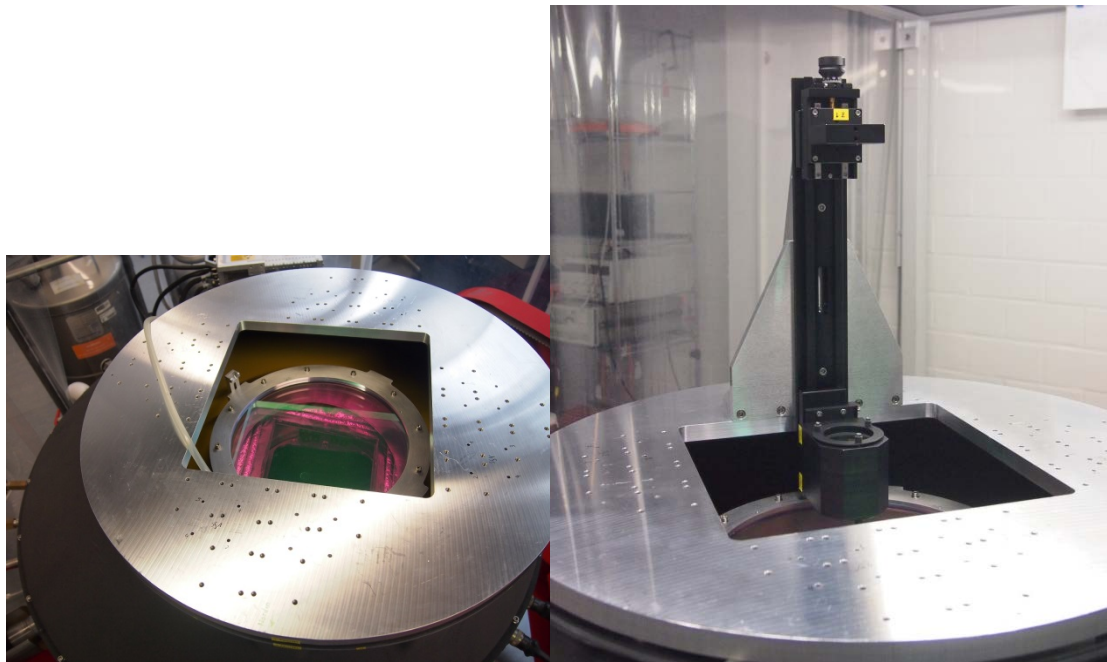


Imagen 5-62: Izqda.: Interfaz para el SS instalado en el TA de PANIC. Dcha.: SS instalado en una de las posiciones de muestreo del campo de visión.

La toma de datos para la verificación de la calidad de imagen consiste en realizar las siguientes exposiciones (explicado en más detalle en el apéndice D, sección D.1):

- Para cada filtro de ciencia instalado en PANIC se realizan las medidas en las 16 posiciones del FoV.
- Partiendo de la posición nominal **A** se realiza una serie de foco y se mide el FWHM de la imagen obtenida que es la mediana de la serie de foco y como error la desviación estándar de esa determinación. La Imagen 5-63, dcha. arriba, muestra el detalle del tornillo micrométrico que permite el desplazamiento de la posición de la fibra objeto del SS para realizar la serie de foco.

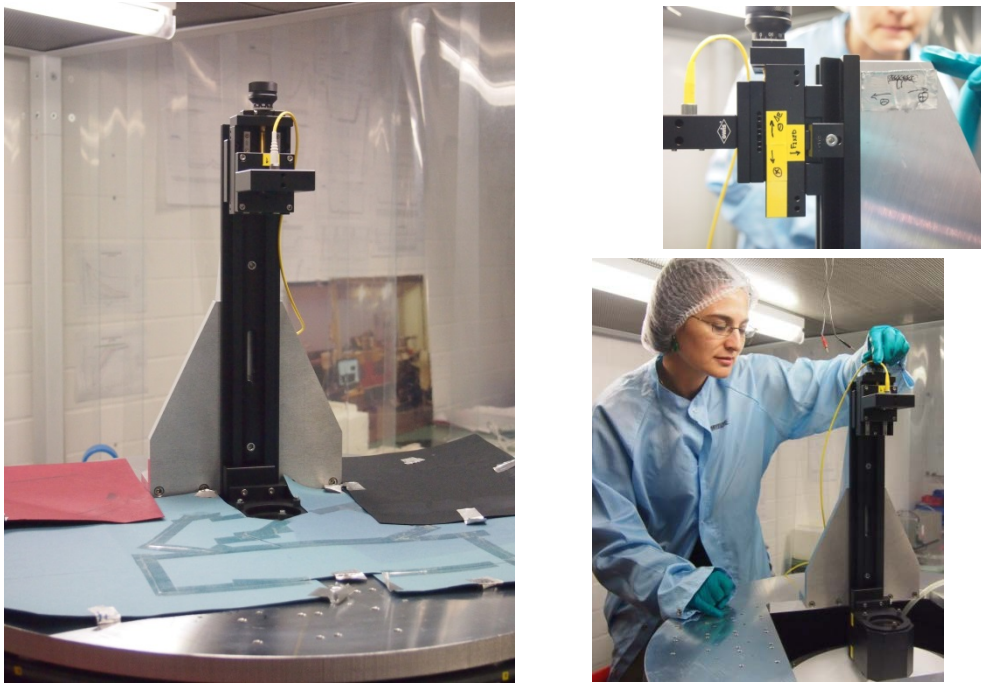


Imagen 5-63: Izqda.: SS preparado para la toma de imágenes. Dcha. arriba: Detalle del ajuste en foco del SS. Dcha. abajo: Ajustando en foco la posición de la fibra objeto del SS.

Según se explica en el apéndice D, sección D.2, del modelo óptico del sistema, compuesto por el simulador de estrella más el sistema óptico de PANIC, se obtiene que este tipo de objeto produce una imagen en el detector de PANIC con un FWHM del orden de 1.5 px. La prestación esperada en términos del FWHM expresado en px, para cada banda espectral y posición, se resumen en la Tabla D-5.

Los resultados de las medidas realizadas con el SS se comparan con dicha prestación esperada del SS, tanto para las cuatro posiciones como el valor calculado por cuadrante. Tras el análisis de las imágenes con el filtro K_S para las 16 posiciones se encuentra que el sistema presenta mucha simetría y que es posible analizar todo el FoV analizando para cada filtro las siguientes posiciones: **SG1-posición 1**, **SG2-posición 2**, **SG3-posición 4** y **SG4-posición 3**.

La Tabla 5-8 compila las medidas finales realizadas en laboratorio antes del transporte con PANIC en posición cenital. Se observa que el tamaño de las imágenes medido es siempre menor que el tamaño predicho por el modelo óptico, salvo algún punto aislado en el filtro Z y filtro Y , pero aún en estos caso la desviación es del orden de 0.1 px.

Además las imágenes no presentan anomalías en la forma de la imagen, siendo señal de que no hay presencia de aberraciones de fuera de eje en el sistema óptico de PANIC. Los resultados de estas pruebas están recogidos en un informe interno del proyecto (Dorner & Cárdenas Vázquez, PANIC Star Simulator test report 2: pre-transport, 2014, November).

Por otro lado, también se realizan medidas de la variación del tamaño de la imagen para diferentes inclinaciones de PANIC, obteniendo similares resultados en la calidad de imagen. Con el filtro K_S , el FWHM medio en todo el plano focal resultante es de **1.46 ± 0.2 px**, concluyendo que no hay un cambio en la calidad de imagen debido a la inclinación de la cámara durante su operación en telescopio. También los resultados de estas pruebas están recogidos en un informe interno del proyecto (Dorner & Cárdenas Vázquez, PANIC Star Simulator test report, 2015, September).

Filtro Z				Filtro Y			
Posición	FWHM (px)			Posición	FWHM (px)		
	Modelo	Medido	Diferencia		Modelo	Medido	Diferencia
SG1-1	0.64	0.75	0.11	SG1-1	0.87	0.92	0.05
SG2-2	1.23	1.25	0.02	SG2-2	1.31	1.28	-0.03
SG3-4	1.19	1.34	0.15	SG3-4	1.27	1.60	0.33
SG4-3	1.89	1.74	-0.15	SG4-3	1.95	2.11	0.16
Promedio FoV	1.24 ± 0.51	1.27 ± 0.41	0.03	Promedio FoV	1.35 ± 0.45	1.48 ± 0.51	0.13
Filtro J				Filtro H			
Posición	FWHM (px)			Posición	FWHM (px)		
	Modelo	Medido	Diferencia		Modelo	Medido	Diferencia
SG1-1	1.08	0.99	-0.09	SG1-1	1.36	1.09	-0.27
SG2-2	1.41	1.15	-0.26	SG2-2	1.59	1.48	-0.11
SG3-4	1.38	1.25	-0.13	SG3-4	1.56	1.52	-0.04
SG4-3	2.03	1.61	-0.42	SG4-3	2.15	1.94	-0.21
Promedio FoV	1.48 ± 0.40	1.25 ± 0.26	-0.22	Promedio FoV	1.67 ± 0.34	1.51 ± 0.35	-0.16
Filtro K _s				Filtro H ₂			
Posición	FWHM (px)			Posición	FWHM (px)		
	Modelo	Medido	Diferencia		Modelo	Medido	Diferencia
SG1-1	1.34	1.10	-0.24	SG1-1	1.48	1.12	-0.36
SG2-2	1.51	1.24	-0.27	SG2-2	1.64	1.12	-0.52
SG3-4	1.49	1.33	-0.16	SG3-4	1.62	1.46	-0.16
SG4-3	2.08	1.55	-0.53	SG4-3	2.17	1.56	-0.61
Promedio FoV	1.64 ± 0.30	1.30 ± 0.20	-0.30	Promedio FoV	1.73 ± 0.30	1.32 ± 0.23	-0.41

Tabla 5-8: Tamaño de la imagen en términos de FWHM esperado por el modelo óptico del SS+PANIC y su correspondiente medida experimental en laboratorio antes de transporte.

La Imagen 5-64 es un ejemplo de la imagen en foco del SS obtenida con el Filtro K_s en el detector de PANIC para dos posiciones del campo analizado. Se observa que el tamaño FWHM de la misma es menor de 2 px.

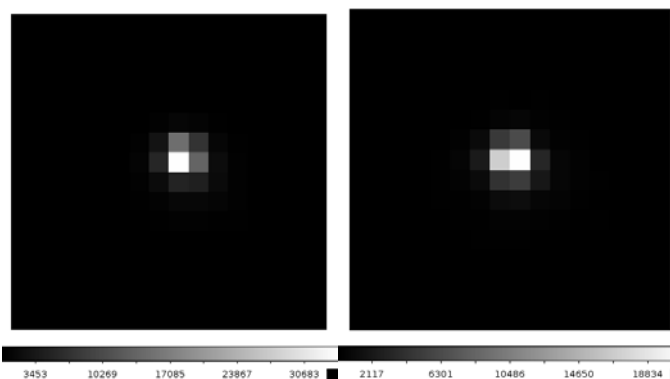


Imagen 5-64: Ejemplo de la imagen obtenida en PANIC en laboratorio con el SS en dos posiciones del campo. Cada cuadrado iluminado es un pixel del detector.

5.2.8. DESENSAMBLADO Y TRANSPORTE A CAHA

Con el instrumento validado en laboratorio se da luz verde a su envío al observatorio de destino. Finalmente, el instrumento es desmontado y empaquetado para su transporte a CAHA. Por cuestiones de seguridad de la supervivencia al transporte del instrumento completo éste ha de ser desmontado en partes.

Durante el AIV del instrumento en laboratorio la repetitividad de posicionamiento de las dos grandes estructuras, OM1 y OM2, ha sido comprobada. También lo ha sido la repetitividad de la interfaz del detector durante el ajuste de éste. Por tanto se decide desensamblar PANIC en las principales partes (Imagen 4-13): la EW, la OM1, la OM2, el FPA, y el criostato de PANIC montado en su carrito de laboratorio (rojo, Imagen 5-45 e Imagen 5-66). Las estructuras OM1 y OM2 llevan integrada toda la óptica durante el transporte. El equipo de mecánicos diseñan cajas de transporte específicas para cada estructura con una amortiguación adecuada (Imagen 5-65).

También se suministra un carrito auxiliar de transporte (Imagen 5-66 dcha.) de PANIC para las operaciones en CAHA. Este carrito dispone de una mesa de tijera que permite elevar PANIC en la vertical hasta acoplarlo al foco *Cassegrain* de los telescopios.

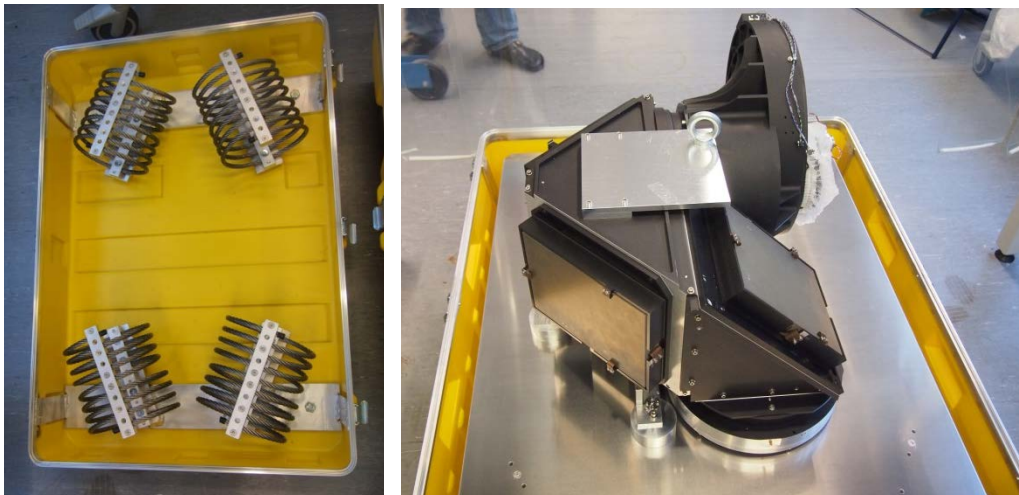


Imagen 5-65: Izqda.: Detalle de los amortiguadores de la caja de transporte de la OM1. Dcha.: OM1 instalada en la caja de transporte.

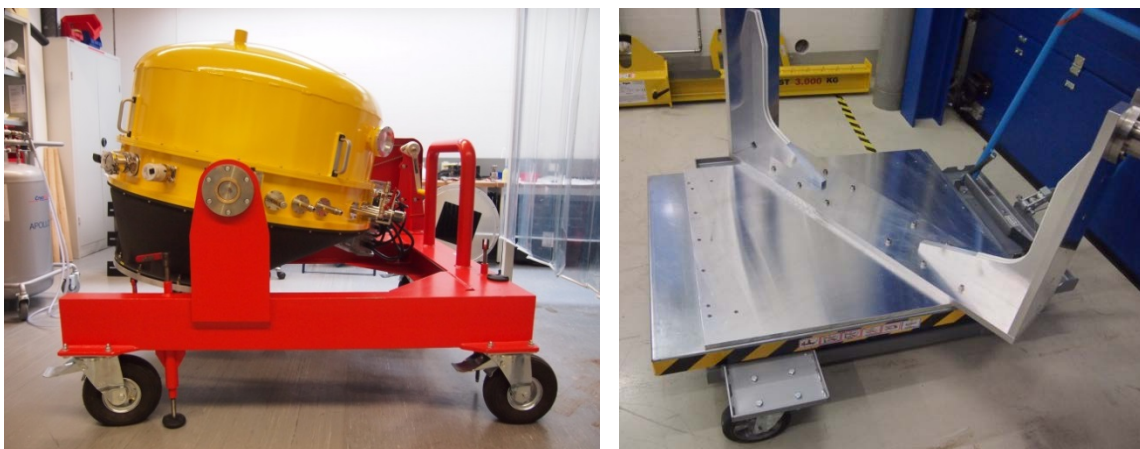


Imagen 5-66: Izqda.: Criostato de PANIC, sin óptica integrada, preparado para su transporte en su carrito auxiliar de laboratorio. Dcha.: Carrito auxiliar de transporte de PANIC al telescopio.

5.3. FASE DE ALINEADO Y VERIFICACIÓN DE PANIC EN AMBOS TELESCOPIOS DE CAHA

Finalmente, los trabajos de esta tesis concluyen con la instalación de PANIC en los telescopios T22 y T35, su ajuste, su cualificación y su puesta a punto con objetos astronómicos reales. El trabajo de la doctoranda en esta fase comprende, además del trabajo de laboratorio diurno, la realización de observaciones nocturnas para la obtención de datos que permitan calcular los ajustes necesarios para el alineado de la cámara al telescopio y la realización de dichos cálculos.

Esta última fase del proyecto tiene lugar en las instalaciones del Observatorio de Calar Alto, durante las campañas técnicas llevadas a cabo en el tiempo asignado de telescopio y se extiende desde octubre de 2014 a marzo de 2015. Comprende las siguientes tareas:

- Reensamblaje del sistema en sala limpia después de su transporte.
- Realización de las pruebas de calidad óptica en laboratorio después del transporte.
- Montaje en el telescopio T22 y su ajuste y alineado con objetos astronómicos reales.
- Montaje en el telescopio T35 y su ajuste y alineado con objetos astronómicos reales.

Es conveniente aclarar que previamente al traslado del instrumento al observatorio y con la antelación requerida por el observatorio (normalmente un semestre), la investigadora principal de PANIC hace la petición de tiempo de telescopio correspondiente para el comisionado del instrumento. De este modo las campañas técnicas durante las que se han realizado las actividades que aquí se relatan tienen lugar dentro de esos tiempos asignados, tanto en el T22 como en el T35.

5.3.1. PRUEBAS DE LABORATORIO DESPUÉS DEL TRANSPORTE

En octubre de 2014 se recibe PANIC en CAHA, y es completamente reensamblada en la sala limpia que se encuentra en el edificio del T35 (Imagen 5-67).

En sala limpia se comprueba la correcta operación de la electrónica de control de las ruedas (la rueda de pupilas y las ruedas de filtros) y del detector a temperatura ambiente (Imagen 5-68, a)).

Se traslada a la sala limpia de aluminizado donde se enfría (Imagen 5-68, b)) hasta su temperatura de trabajo y se comprueba el correcto funcionamiento del detector y su electrónica en condiciones de operación.

La cámara debía ser instalada en el T22 en primer lugar, de modo que hubo de ser trasladada del edificio del T35 a la sala de operaciones del T22 (Imagen 5-69, izqda.) y allí se mide su calidad óptica en cada banda fotométrica con ayuda del SS (Imagen 5-69, dcha.), siguiendo el mismo protocolo que el laboratorio del MPIA antes de su transporte (sección 5.2.7). El resultado de la repetición de estas pruebas de calidad óptica después del transporte se presenta en la siguiente sección 6.2 de resultados en laboratorio, en particular en la Tabla 6–5, en la columna de "Medidas en laboratorio, Después de

transporte”, confirmando que el alineado óptico y calidad óptica del instrumento se ha preservado y permitiendo así la instalación en telescopio.

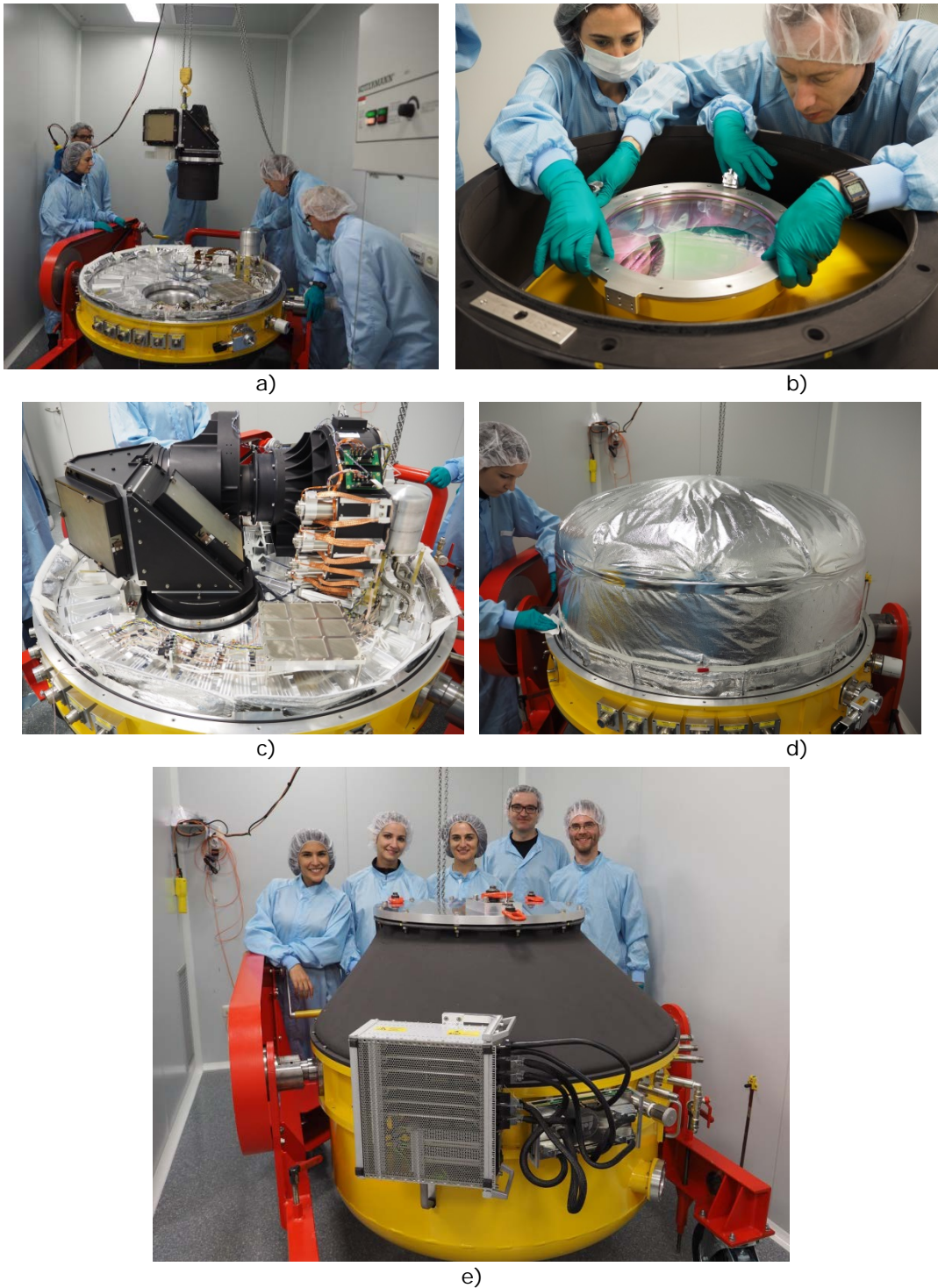


Imagen 5-67: Muestra de algunos pasos durante el reensamblaje del instrumento en la sala limpia de CAHA. a) Integración de la estructura OM1. b) instalación de la ventana de entrada del criostato. c) Instalada la OM2. d) Instalando el escudo de radiación del criostato. e) Equipo satisfecho y contento.



Imagen 5-68: Izqda.: Comprobación del corrector funcionamiento de los detectores. Dcha.: Enfriado del instrumento en la sala limpia de aluminizado del T35.



Imagen 5-69: Izqda.: Transporte del instrumento frío entre los edificios del T35 y el T22. Dcha.: Realización de las pruebas de calidad óptica después de transporte en las instalaciones del T22.

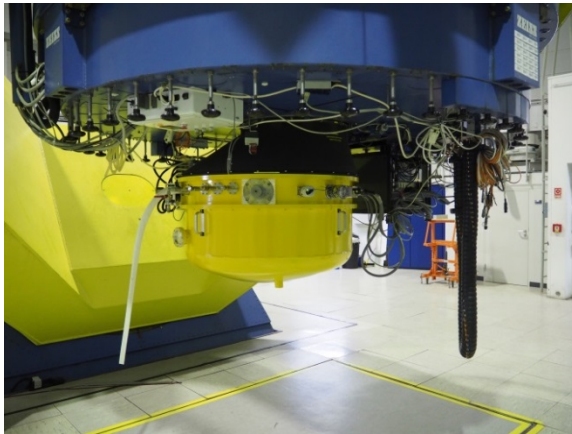
5.3.2. MONTAJE Y AJUSTE EN EL T22

La instalación en el T22 tiene lugar el día 6 de noviembre de 2014 (Imagen 5-70), y para su primera luz se aprovechó la ocasión de que era noche de luna llena, del 6 al 7 de noviembre, para tomar una imagen que mostrase el gran campo de visión de la cámara (Imagen 5-71). La primera luz de un instrumento astronómico es el hito más importante de su desarrollo. Como curiosidad, para la toma de esta imagen de la luna hubo que viñetear la luz que entra al telescopio usando la cúpula y usar el tiempo mínimo de exposición de los detectores de PANIC, dada la intensidad de la luna en el infrarrojo.

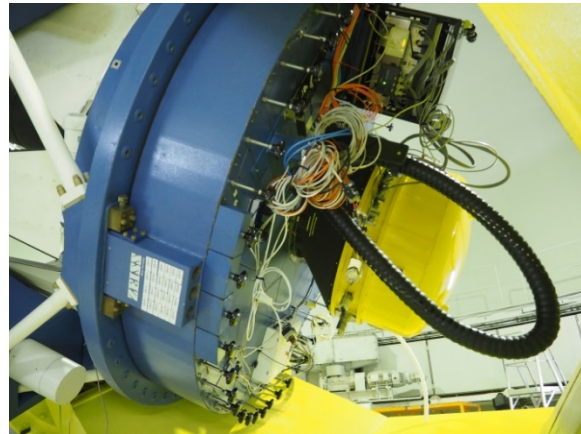


a)

b)



c)



d)

Imagen 5-70: Montando por primera vez el instrumento en el T22. a) Presentando el instrumento debajo de la interfaz a foco *Cassegrain*. b) Prueba de interfaces. c) PANIC y su electrónica instalados en el telescopio. d) PANIC viajando solidaria con el telescopio durante la realización del equilibrado del telescopio.

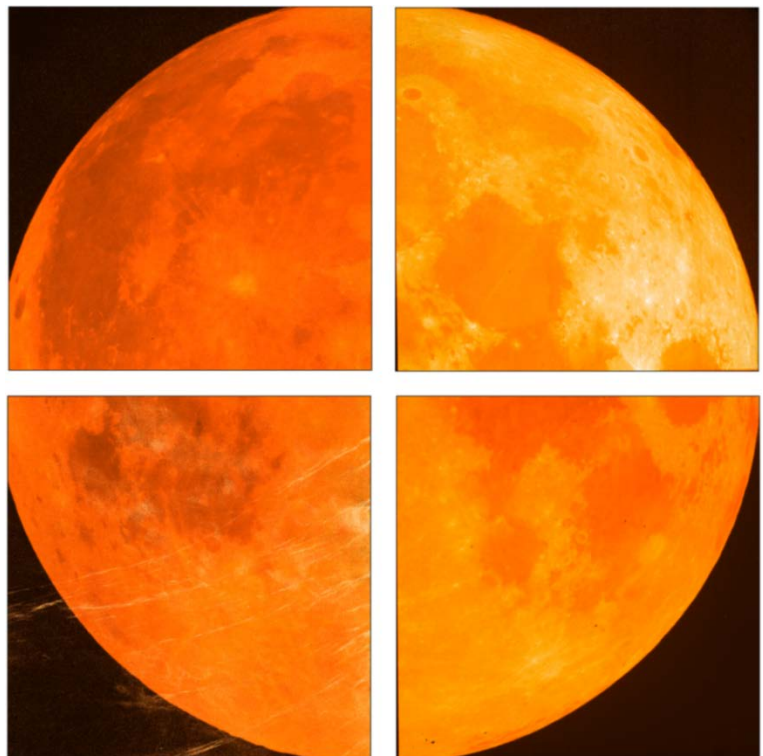
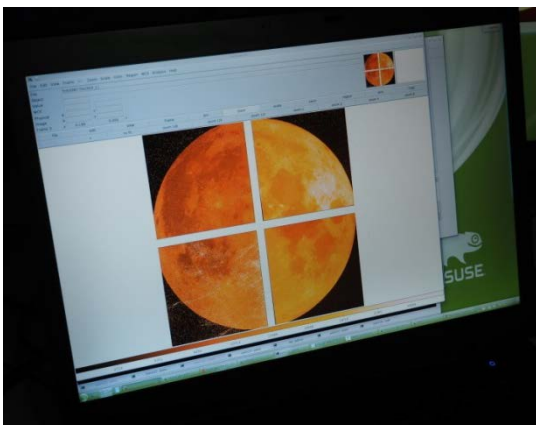


Imagen 5-71: Imagen en directo de la luna llena del 6 de noviembre de 2014, correspondiente a la primera luz de PANIC.

El último paso del AIV es el alineado del eje opto-mecánico del instrumento al del telescopio. En el T22 este proceso nos lleva tres campañas técnicas entre los meses de noviembre de 2014 hasta el final de enero de 2015.

En base al análisis de tolerancias del diseño óptico final (Tabla 4–9) es necesario ajustar el instrumento en inclinaciónX e inclinaciónY en la interfaz del instrumento al foco RC del telescopio con una precisión de ± 4.2 arcmin en el T22. Sin embargo, en el modelo óptico del sistema construido, gracias a la inserción en el modelo de los valores reales de los elementos construidos y cuya tolerancia es el error de la medida del mismo, las tolerancias de posicionado y, en particular, del alineado en inclinación al telescopio se ven relajadas hasta los ± 8 arcmin en el T22 y hasta los ± 12 arcmin en el T35.

Los demás grados de libertad de la interfaz no requieren de ajuste, pues recordemos que la precisión de posicionado en X/Y era relajada, de 0.5 mm, y se consigue por diseño de la interfaz. La posición en Z no requiere de ajuste, pues se traslada a un reenfoque del telescopio que se realiza mediante el espejo secundario del mismo.

Para el ajuste en inclinación, el diseño mecánico incluye 12 cilindros remecanizables en altura (Imagen 5-72) en la interfaz entre la cámara, en su TA al acople al telescopio (Imagen 5-73), numerados del 1 al 12 y cuya posición en la interfaz es única y no intercambiable.

En previsión de que este ajuste se hará por iteraciones se fabricaron cinco juegos de estos cilindros. Todos ellos se fabrican a las alturas nominales de 14 mm de grosor total y 7.9 mm de grosor remecanizable. En la Imagen 5-72 se muestra el diseño de fabricación de esta pieza realizado por el ingeniero mecánico (izqda.), así como la especificación para el primer remecanizado del primer juego (dcha.) tras la primera iteración en el ajuste al T22.

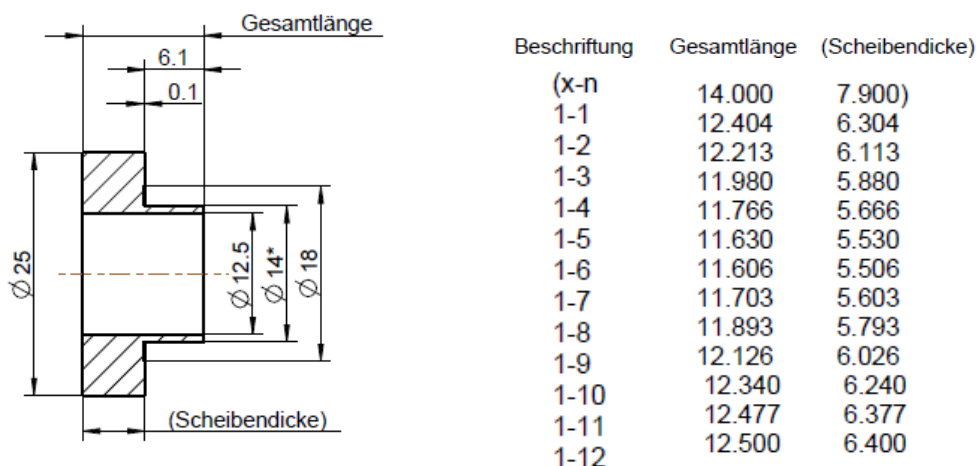


Imagen 5-72: Cilindros remecanizables de la interfaz de la cámara al telescopio. Izqda.: plano de fabricación. Dcha.: especificación del primer remecanizado del juego #1.

El proceso de ajuste en el telescopio engloba las siguientes tareas:

1. Determinación de la orientación del campo en el detector.
2. Ajuste en rotación de PANIC en el foco RC del telescopio.
3. Adquisición de imágenes de objetos cenitales y campos poblados de estrellas.
4. Determinación de la inclinaciónX/inclinaciónY de PANIC con respecto al plano focal del telescopio mediante análisis de las series de foco.

5. Cálculo del remecanizado a aplicar a los cilindros de ajuste de la interfaz.
6. Desmontaje de la cámara del foco del telescopio y remontaje con los nuevos cilindros.
7. Repetición de los pasos 3 a 6 hasta que la inclinaciónX/inclinaciónY del instrumento dé una calidad de imagen homogénea en todo el FoV.
8. Alineado de la máscara de pupila.

Estas tareas son algunas nocturnas y otras diurnas. Las nocturnas (1, 2 y 3) necesariamente necesitan de imagen de cielo para poderse realizar, y las diurnas (4, 5, 6 y 8) que no necesitan de objetos de cielo como son la finalización de la reducción de los datos, y los cálculos exhaustivos para la determinación de la inclinación a corregir y el remecanizado de los cilindros de la interfaz y su instalación.

Primeramente, se acopla PANIC al foco RC del telescopio con un el juego de cilindros #1 con dimensiones nominales.

Seguidamente, para orientar el instrumento correctamente con respecto al cielo, se instalan en el TA las etiquetas del ESTE (Imagen 5-73, izqda., en inglés "EAST") y del OESTE (Imagen 5-73, dcha., en inglés "WEST") con sus pines de posicionamiento a la interfaz mecánica del telescopio. En primera aproximación se posiciona el NORTE de la cámara hasta hacerlo coincidir con el NORTE del foco del telescopio (Imagen 5-74).

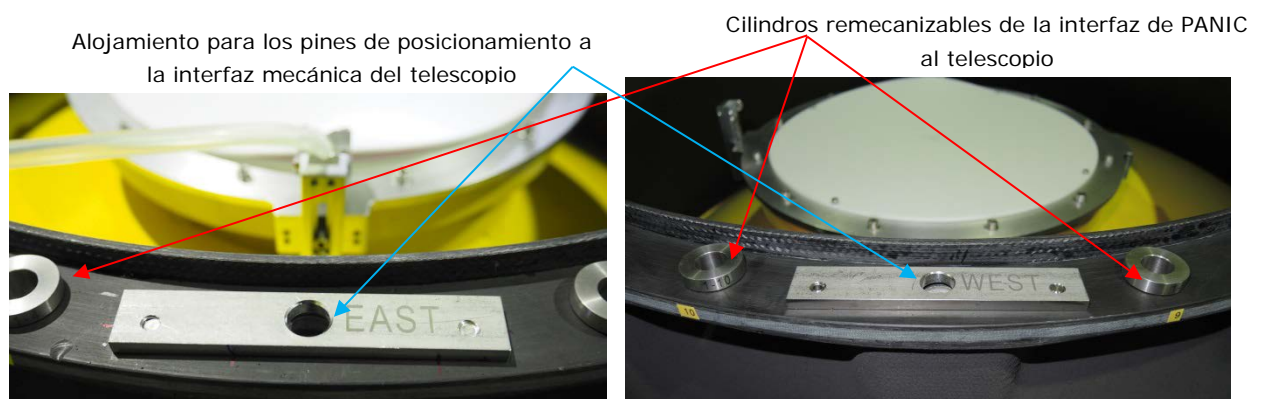


Imagen 5-73: Detalle de la localización de los acoples de posicionamiento ESTE y OESTE del instrumento. También se pueden ver los cilindros remecanizables instalados en sus correspondientes posiciones de la interfaz.

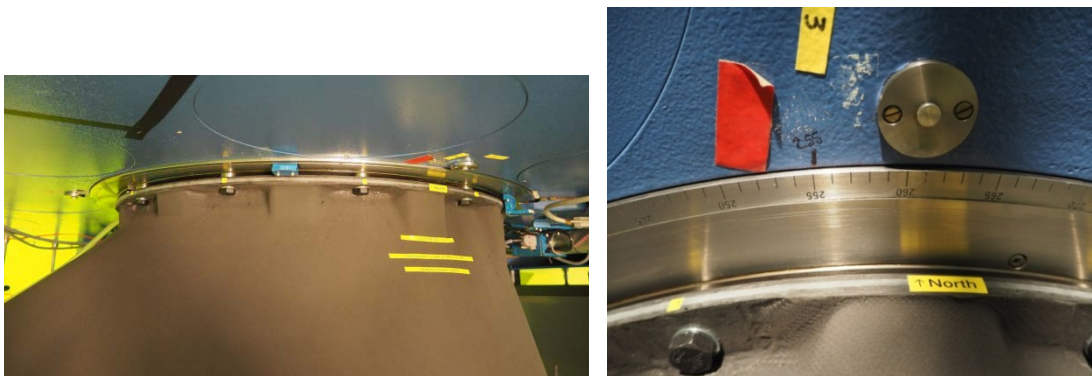


Imagen 5-74: Izqda.: Detalle de la interfaz del TA de PANIC, la orientación NORTE de la cámara se hace coincidir con la indicación N del foco del telescopio. Dcha.: Detalle del rotador del telescopio y la orientación de la cámara.

Luego, durante la noche comienzan las tareas de ajuste usando imágenes reales de objetos astronómicos. La determinación de la orientación del campo en el detector se realiza moviendo el telescopio desde la posición cenital, primero hacia el SUR y luego hacia el ESTE, observando el correspondiente desplazamiento en la imagen obtenida en el detector. Con ello se marca la orientación del campo en el detector.

El segundo paso es hacer el ajuste fino de la **rotación** del instrumento en la interfaz del foco del telescopio. Para ello con el telescopio en cualquier posición de declinación, se mueve éste de NORTE a SUR, y siguiendo una estrella en el detector se calcula la inclinación residual del instrumento con respecto al norte del telescopio. Se aplica esta corrección rotando el instrumento físicamente en el foco del telescopio. Esta operación se repite desde el residuo inicial de 7 grados de diferencia hasta reducir el residuo a **0.2 grados** que es completamente asumible por el software de procesamiento de imágenes de PANIC.

Determinada esta posición, se instala un límite físico en el rotador del telescopio en la interfaz con la cámara para instalar la cámara de forma repetitiva en dicho telescopio.

En tercer lugar, para la determinación de la inclinaciónX/inclinaciónY del instrumento, se toman imágenes de campos poblados de cielo conocido lo más cenital posible.

El campo poblado de estrellas da una distribución homogénea en el detector de PANIC de forma que se muestrea todo el FoV de la cámara, lo que conlleva un ajuste más fidedigno de la inclinación del plano focal.

La localización cenital de los campos es necesaria para ajustar la cámara al telescopio en la posición intermedia de su rango de operación en telescopio.

Se usan imágenes en los filtros **Z, Y, J, H, K_s, y H₂** de cúmulos abiertos tomadas con un *seeing* atmosférico de 1 arcsec (en la banda V) y se adquieren series de foco en cada filtro y en al menos dos campos por noche.

Las anteriores series de foco se procesan para obtener el mejor foco para cada filtro. Para ello se mide el FWHM de la imagen obtenida en PANIC en varios puntos del detector con ayuda de la herramienta de software *QuickLook* (Ibáñez Mengual, 2017) que hace un ajuste gaussiano para la determinación del mejor foco en una serie de focal. Una vez determinado el mejor foco se adquiere la imagen en foco que es la que se usará para la determinación de la inclinación del instrumento con respecto al telescopio.

En cuarto lugar, las imágenes en foco corregidas de *dark*, de *flat* y de *bad pixels*, se analizan, identificando las estrellas del campo y midiendo el FWHM de las mismas a lo largo de todo el campo de visión de la cámara. La Imagen 5-75 muestra un ejemplo de este tipo de imagen corregida, y corresponde al cúmulo abierto M67 en la noche del 8 de diciembre de 2014. En la ventana superior derecha de dicha imagen se aprecia un *zoom* de una pequeña área en donde se pueden localizar varias estrellas.

Para las imágenes en cada filtro se ajusta el plano a los puntos con mínimo FWHM, que da cuenta de la posición del mejor foco, y con ello se calcula la inclinación del plano focal real. El procedimiento es similar al realizado para la determinación del mejor plano de foco en el ajuste del FPA de PANIC en laboratorio.

En quinto lugar, se calcula la remecanización necesaria en los cilindros de la interfaz. El mejor plano calculado anteriormente nos permite determinar cuál es la

inclinaciónX/inclinaciónY de PANIC con respecto al plano focal del telescopio y trasladarla a la posición del adaptador a telescopio y, en consecuencia remecanizar los cilindros de la interfaz.

El proceso de minimización de la inclinación conllevó tres iteraciones hasta conseguir un valor residual de ± 7.09 arcmin. El tamaño FWHM de las imágenes en todos los filtros está por debajo de los 1.1 arcsec (en imágenes tomadas cuando el *seeing* atmosférico es de 1 arcsec en la banda V). Estos resultados trasladados a la calidad óptica de PANIC conllevan a la obtención de una D_{EE80} del orden de **0.8 arcsec** requeridos para cualquier banda fotométrica, como se resumirá más adelante en la sección 6.3 del capítulo de Resultados.

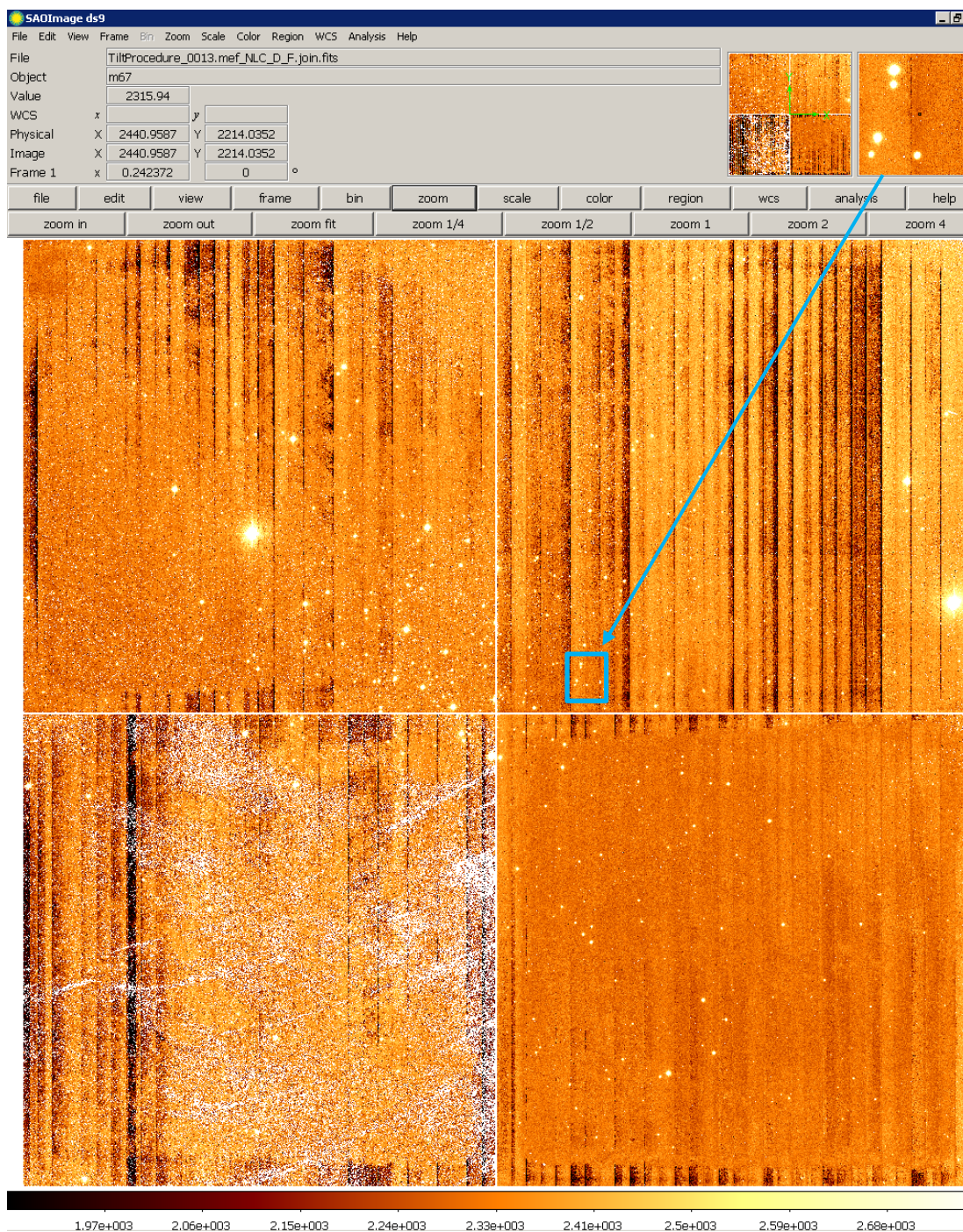


Imagen 5-75: Ejemplo de imagen usada para el ajuste de inclinación de PANIC, correspondiente al cúmulo abierto M67.

Por último, es posible alinear la máscara de pupila de PANIC para este telescopio. Este alineado ha de estar optimizado para la banda fotométrica K_s , así se usa la PIL con este filtro. En este modo de operación recordemos que en el detector del instrumento, la imagen resultante, es una superposición de la imagen del espejo primario y del diafragma de apertura de PANIC instalada en la rueda de pupilas frías. Durante la operación del instrumento en el T22 la configuración de la rueda de pupilas frías es tal que se usa el diafragma del T22.

Este ajuste final consiste en coalinear la apertura de este diafragma con el espejo primario del telescopio. Para ello tan solo se dispone del movimiento radial del diafragma dentro de la rueda que corresponde en cielo a la dirección ESTE-OESTE.

La rueda de pupilas tiene una resolución mecánica de $4 \mu\text{m}/\text{paso}$ y la magnificación óptica del modo de reimaginación de pupila en el T22 es de 0.754. De modo que un paso en la rueda de pupilas se corresponde a 0.16 px de desplazamiento en el plano focal de PANIC.

En previsión de que el perímetro exterior del espejo primario no fuese suficientemente nítido como para discernirlo en la cámara, se instalaron una serie de luces halógenas 10 W y 6 V alimentadas a 1 V. Dichas luces fueron usadas como primera aproximación para localizar el espejo primario. Después se desinstalaron, siendo la emisión térmica del espejo suficientemente intensa como para permitir el alineado final sin necesidad de ellas.

El diámetro del diafragma de apertura, 96 mm para el T22, se encuentra sobredimensionado en un 3% por diseño, pues según se demostró en el estudio de FDR aún con este sobredimensionado se aseguraba que el ruido térmico en la banda K era menor al 2% (Tabla 4-7) cuando el requerimiento era del 10%.

Su diámetro sin sobredimensionar, 93.2 mm, se corresponde al tamaño nominal del espejo primario en la posición del diafragma. La diferencia en radio entre ellos es de 1.4 mm (350 pasos de la rueda de pupilas), que trasladado al plano focal de PANIC en el modo de reimaginación de pupila nos da 1.06 mm \cong 60 px. Es decir, que la imagen del espejo primario resultante en el modo de reimaginación de pupila es 120 px menor en diámetro que la imagen del diafragma de pupila. Para el centrado de la imagen del espejo primario tenemos por tanto un rango de 60 px.

Para obtener un buen compromiso entre el alineado de ambas imágenes, en el T22 fue necesario mover la rueda de pupilas un total de 270 pasos (1.08 mm), que en plano focal corresponde a 0.8 mm (\sim 45 px).

La Imagen 5-76 muestra el resultado final de dicho alineado. Dicha imagen corresponde a una exposición mínima (de 2.74 s) en el modo de ingeniería de reimaginación de pupila, usando la PIL en combinación con el filtro K_s , cuando el telescopio está apuntando a una estrella brillante (en este caso ρ Persei) para proveer una iluminación uniforme en el espejo primario del telescopio. En dicha imagen se observa cómo la imagen del primario del T22 se encuentra dentro de la imagen del diafragma de apertura de este telescopio.

Como curiosidad mencionar que también se puede observar la obturación del espejo secundario del telescopio así como la de las arañas que lo sujetan, que en el caso del T22 dichas arañas casi coinciden con la orientación del hueco entre los detectores de PANIC.

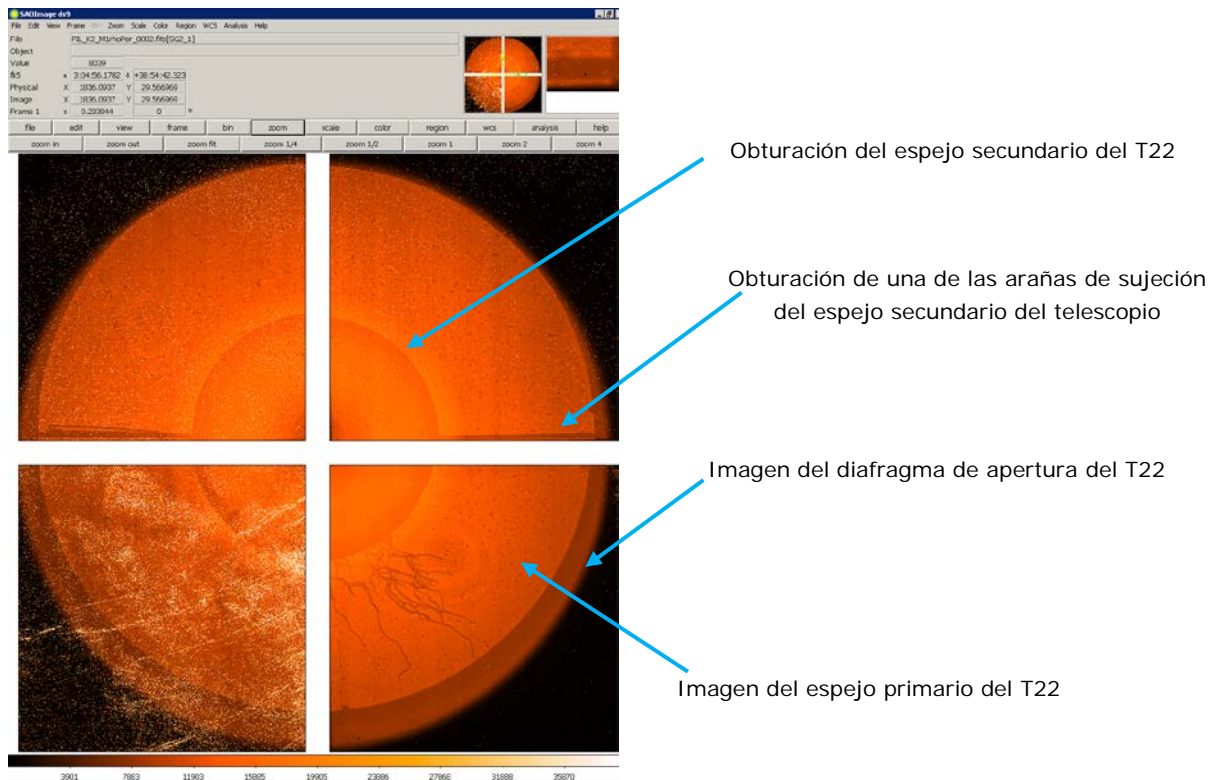


Imagen 5-76: Imagen del modo de ingeniería PIL+K_s para el alineado del diafragma frío con el espejo primario en el T22.

5.3.3. MONTAJE Y AJUSTE EN EL T35

A principios de marzo de 2015 se instala PANIC por primera vez en el T35. Dado que la cámara es trasladada de nuevo entre el edificio del T22 y el T35, se realiza una verificación de la calidad óptica después de este transporte repitiendo las pruebas con el simulador de estrella, constatando que todo está correcto.

Para el acople de PANIC al T35, como ya se ha mencionado anteriormente, tan solo es necesario el adaptador de interfaz entre el T22 y el T35 disponible para todo instrumento en CAHA (Imagen 4-10 y pieza en gris en Imagen 5-77).

El proceso de ajuste en este telescopio conlleva las mismas tareas descritas para el T22 (1 a 8, diurnas y nocturnas) y para ello se necesitaron dos campañas técnicas entre los meses de marzo y mayo de 2015.

El ajuste fino de la **rotación** del instrumento en la interfaz del foco del telescopio se realiza de nuevo con imágenes durante el inicio de la operación nocturna. El resultado final es un residuo de **0.1 grados** (habiendo partido de un residuo inicial de 0.4 grados).

Por otro lado, el proceso de determinación de la inclinaciónX/inclinaciónY es idéntico al descrito en el T22.

Sin embargo, el plan de ajuste en este telescopio se alteró debido a que se produjo un accidente durante el transporte del instrumento dentro del edificio del T35 al terminar la primera campaña de observación y comisionado en este telescopio. En dicho accidente, acaecido a mitad de marzo de 2015, se golpeó una de las válvulas de vacío y la cámara sufrió una pérdida repentina del vacío y por tanto se calentó muy rápido, además de la condensación debida al aire (húmedo) que entró al romperse la válvula.



Imagen 5-77: PANIC montada en el foco RC del T35. Se observa la pieza de adaptación de la interfaz del T22 al T35.

Durante el resto del mes de marzo y abril se procedió a revisar la integridad de todo el instrumento, de sus componentes ópticos y del detector. En la sala limpia del T22 se abrió, de nuevo, el instrumento y se revisaron todos los componentes ópticos, incluidos los filtros dentro de las ruedas. El funcionamiento del detector se verificó en caliente y el personal de CAHA preparó un criostato auxiliar para mantenerlo en condiciones de vacío y baja temperatura durante el tiempo necesario para las reparaciones. Afortunadamente el detector no sufrió daños, ni la óptica, excepto la ventana de entrada del criostato y la válvula de vacío que fue golpeada.

La ventana de entrada del criostato presentaba un daño en el borde, fuera de la apertura óptica. El borde se había lascado y el daño tenía una longitud de 26 mm por al menos 3 mm de profundidad (izqda. en Imagen 5-78). La reparación consistió en retirar la parte dañada mediante fresado con muela de diamante (dcha. en Imagen 5-78).

Asimismo, como medida preventiva, se rediseñó el anillo de aluminio de retención externo para incluir otro anillo de goma en la parte externa de la ventana entre la ventana y dicho anillo de aluminio (además del anillo de goma interno que ya tenía por la parte trasera de la ventana a su alojamiento). Este nuevo anillo de goma puede absorber posibles estreses extra, por ejemplo en situaciones de enfriamiento y/ calentamiento muy rápidos.

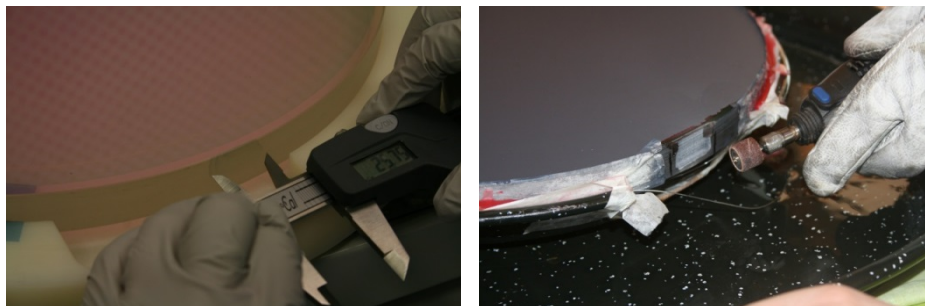


Imagen 5-78: Ventana de entrada del criostato de P. Izqda.: midiendo el tamaño de la lasca. Dcha.: reparando el daño mediante fresado con muela de diamante.

Una vez reparadas la ventana y la válvula, se volvió a reensamblar el instrumento y se repitieron las pruebas de calidad óptica con el simulador de estrella para los filtros extremos del rango espectral, **Z** y **K_S**, con resultados satisfactorios (ver Tabla 6–5, tercera

columna, donde se resumen estos resultados), lo que confirmaba no solo la integridad de todos los elementos ópticos sino también del alineado del instrumento.

Finalmente durante la segunda campaña de observación de mayo de 2015 se terminó el ajuste en alineado de PANIC en este telescopio. Después de dos iteraciones se consigue un valor residual de ± 12 arcmin, dentro de tolerancias permitidas. El tamaño FWHM de las imágenes en todos los filtros está por debajo de los 0.8 arcsec (en imágenes tomadas cuando el *seeing* atmosférico es de 1 arcsec en la banda **V**), que resultan en una calidad óptica de PANIC de una D_{EE80} del orden de **0.5 arcsec** en cualquier banda fotométrica, por debajo de los 0.69 arcsec requeridos. Esta información se resume más adelante en la sección 6.3 del capítulo de Resultados.

De igual modo que en el T22, ahora en el T35 el último paso es alinear la máscara de pupila de PANIC para este telescopio. Con el diafragma del T35 seleccionado en la rueda de pupilas frías y en el modo de ingeniería de la PIL, se hace imagen del espejo primario y el diafragma frío del T35 en la banda **K_s**. Con la experiencia obtenida durante el comisionado en el T22, ahora ya no se instalan las luces perimetrales en el espejo primario al no ser necesarias.

La magnificación óptica del modo de reimaginación de pupila en el T35 es de 0.683. De modo que un paso en la rueda de pupilas se corresponde a 0.15 px de desplazamiento en el plano focal de PANIC.

El diámetro del diafragma de apertura, 81.50 mm para el T35, se encuentra asimismo sobredimensionado en un 3% por diseño. Así su diámetro sin sobredimensionar, 79.1 mm, se corresponde al tamaño nominal del espejo primario en la posición del diafragma. La diferencia en radio entre ellos es de 1.2 mm (300 pasos de la rueda de pupilas), que trasladado al plano focal de PANIC en el modo de reimaginación de pupila nos da 0.82 mm \cong 45 px. Es decir, que la imagen del espejo primario resultante en el modo de reimaginación de pupila es 90 px menor en diámetro que la imagen del diafragma de pupila. Para el centrado de la imagen del espejo primario tenemos por tanto un rango de 45 px.

Al comienzo de este ajuste, la imagen del espejo primario se encontraba muy desalineada con respecto a la del diafragma, tal que para obtener un buen compromiso entre el alineado de ambas imágenes, en el T35 fue necesario mover la rueda de pupilas un total de 590 pasos (2.4 mm), que en plano focal corresponde a 1.61 mm (\sim 90 px).

La Imagen 5-79 muestra el resultado de dicho alineado durante la primera campaña técnica en este telescopio en marzo de 2015. De nuevo es una exposición mínima (de 2.74 s) en el modo de ingeniería de reimaginación de pupila, usando la PIL en combinación con el filtro **K_s**, cuando el telescopio está apuntando a una estrella brillante en posición cenital.

Se puede observar cómo la imagen del primario del T35 se encuentra dentro de la imagen del diafragma de apertura de este telescopio en la dirección ESTE-OESTE, quedando cierto residuo en la posición NORTE-SUR. Para ajustar el eje NORTE-SUR no se puede usar el propio movimiento de la rueda pues éste solo ajusta ESTE-OESTE como se ha mencionado. Es necesaria la instalación de una nueva máscara en la rueda de pupilas descentrada 6.6 mm en el eje radial de la rueda (que equivale al descentrado de 250 px que se observa en el eje NORTE-SUR. Durante el comisionado de la cámara se decidió que

el equipo científico decidiría si era necesaria dicha actuación en base a las medidas de la relación señal-ruido en la banda K.

Como curiosidad mencionar que también se puede observar la obturación del espejo secundario del telescopio así como la de las arañas que lo sujetan, que en el caso del T35 se encuentran dispuestas a 45° con respecto a la orientación del hueco entre los detectores de PANIC.

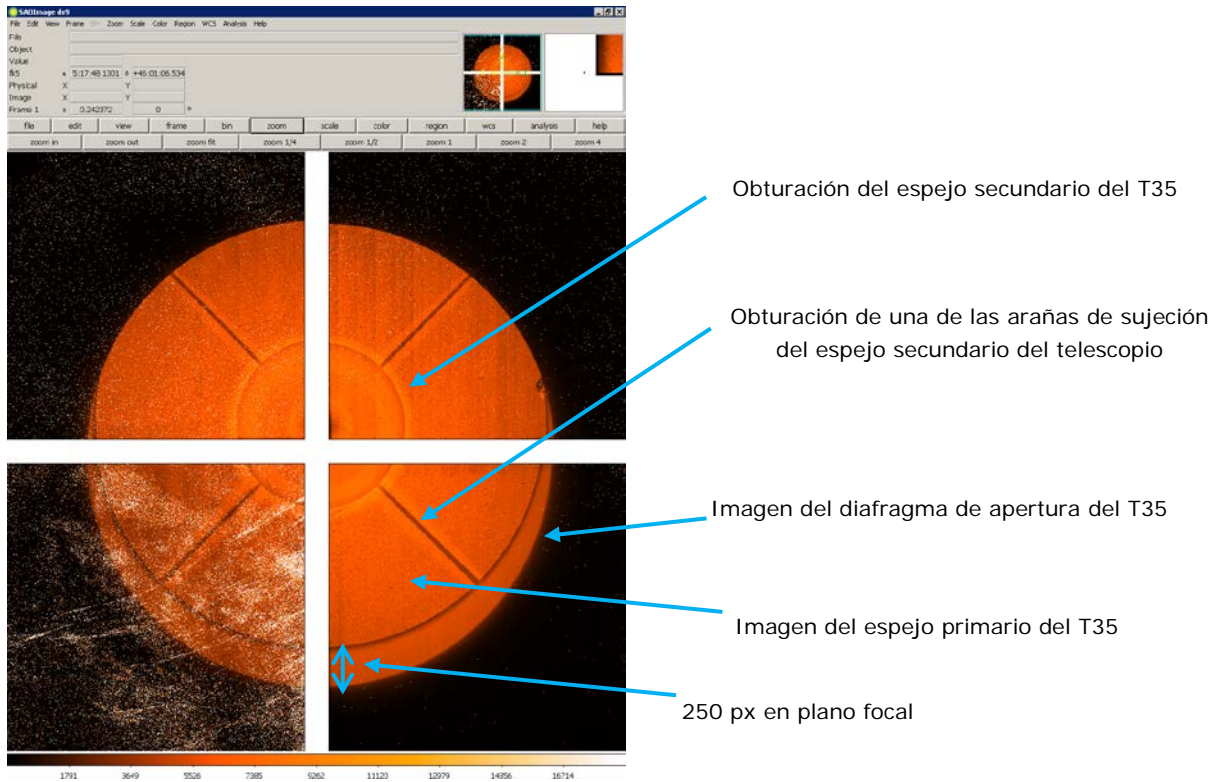


Imagen 5-79: Imagen del modo de reimaginación de pupila en el T35.

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE PRESTACIONES

En este capítulo se condensa el fruto de los anteriores años de trabajo. Primeramente, se expone el diseño óptico construido e implementado en PANIC, incluyendo el juego de filtros de ciencia instalado para la operación de la cámara. Luego se resume y presentan los resultados de calidad de imagen del instrumento obtenidos en laboratorio, antes de su desmontaje para ser transportado y después de su reensamblaje en su lugar de destino, en el Observatorio de Calar Alto. Por último, se muestran las prestaciones obtenidas durante el comisionado de la cámara en ambos telescopios y tras haber sido propiamente alineada la cámara a cada telescopio. Se comparan estas prestaciones con las predichas por el diseño óptico construido.

6.1. SISTEMA CONSTRUIDO

6.1.1. SISTEMA ÓPTICO

El diseño óptico presentado en FDR (se puede ver más detalle sobre el diseño de FDR, en el capítulo 4, sección 4.3 y en el apéndice C, sección C.2) sufre ciertos cambios durante la iteración detallada para su fabricación (más detalle sobre el sistema en fabricación se encuentra en la sección C.3). También el diseño se ha de retocar para acomodarlo a las temperaturas reales de trabajo del instrumento.

En el apéndice C se detallan los datos esenciales de la modelización de los sistemas ópticos tanto del diseño del modo científico de la cámara, como del diseño del modo de reimaginación de la pupila.

De ambos modos de operación, se presenta el diseño óptico de FDR y el construido.

En la siguiente Tabla 6–1 se resumen las prestaciones obtenidas del diseño óptico final de PANIC trabajando en ambos telescopios, donde, como ya se expuso en la sección 4.3, y en particular, en la Tabla 4–10, se cumplen todos los requerimientos. Ahora también se incluyen las prestaciones de la pupila.

En la Tabla 6–2 se listan las prestaciones obtenidas del diseño óptico construido de PANIC trabajando en ambos telescopios. El detalle del diseño construido se presenta en el apéndice C, sección C.4. Se comprueba que los valores de las prestaciones del sistema construido se encuentran dentro del margen de error esperado en FDR (Tabla 6–1) y que, por tanto, el sistema construido cumple todas las especificaciones del sistema.

Además, en el sistema construido los márgenes de error son menores al ser introducidos todos los valores reales medidos después de la construcción de los elementos ópticos y como tolerancia de ese valor el error instrumental del parámetro en cuestión medido.

Recordemos que el diseño de la PIL en el modelo construido es diferente al presentado en FDR, pues como se explica en la sección C.4, el cambio de temperatura de trabajo del instrumento conllevó ciertos ajustes, entre ellos el rediseño de la PIL. Así los valores de la prestación de la reimaginación de la pupila de la Tabla 6–2 no se han de comparar con los de la Tabla 6–1 al corresponder a diseños diferentes. En cualquier caso ambos cumplen los requerimientos, pero son los de la Tabla 6–2 los valores que se han de comparar con los datos de comisionado en telescopio.

Telescopios de CAHA		
Parámetro	T22	T35
Estación focal	Foco RC	
Diámetro de la Pupila de entrada	2.2 m	3.5 m
Relación focal	f/8	f/10
FoV sin viñeteo en el foco RC	33 arcmin = 170 mm	29.5 arcmin = 300 mm
Escala de placa en el foco RC	11.7 arcsec/mm	5.89 arcsec/mm
Máximo peso	400 kg	> 400 kg
Longitud desde el plano focal	1100 mm	> 1100 mm
Mecanismo de enfoque	Espejo secundario del telescopio	
Prestaciones de PANIC		
Parámetro	T22	T35
Modo de operación	Imagen, en todo el FoV	
Rango espectral	(0.8 – 2.5) μm	
Filtros	Anchos: Z, Y, J, H y K_s Estrechos: ~1%	
Temperatura de operación	80 K	
Longitud total desde ventana de entrada del criostato al detector	1890 mm	
Reimaginador de pupila Optimizado para la banda K	Común para ambos telescopios Una única lente de ZnSe en la posición de los filtros	
Diafragma de campo	Frío y común para ambos telescopios	
Diafragma de apertura	Frío y optimizado para T22	Frío y optimizado para T35
Transmisión	~ 50.6 % (ventana del criostato, 9 lentes y 3 espejos recubiertos con oro)	
Magnificación lateral	0.468 ± 0.003	
Longitud focal efectiva	(8255 ± 30) mm	(16390 ± 50) mm
Relación focal F#	3.746 ± 0.014	4.678 ± 0.015
Escala de placa	(0.445 ± 0.003) arcsec/px	(0.224 ± 0.002) arcsec/px
FoV, lado	(31.6 ± 0.3) arcmin	(15.88 ± 0.11) arcmin
Calidad de imagen del modelo óptico D _{EE80}	(28 ± 3) μm = (1.53 ± 0.15) px (≤ 2 px)	(35 ± 4) μm = (1.94 ± 0.22) px (≤ 3 px)
Distorsión máx (esquina del campo de visión)	(1.34 ± 0.04) %	(1.38 ± 0.04) %
Detector infrarrojo	Mosaico de 4096×4096 px, 18 μm , HAWAII-2RG con cut-off en 2.5 μm	
Hueco entre detectores: ≤ 167 px	≤ 75 arcsec	≤ 38 arcsec
Diámetro de la imagen de pupila en el detector	(73.2 ± 0.9) mm	(57.0 ± 1.0) mm
Calidad imagen pupila, radio rms	(1.944 ± 0.022) mm	(1.55 ± 0.03) mm
Resolución de la imagen de pupila	(2.66 ± 0.06) %	(2.72 ± 0.10) %

Tabla 6–1: Prestaciones del diseño óptico final de PANIC en sus condiciones de trabajo.

Prestaciones de PANIC		
Parámetro	T22	T35
Temperatura de operación	Óptica: ~ 95 K, Filtros: ~ 100 K, Detector: ~ 80 K	
Transmisión	~ 57.6 % (ventana del criostato, 9 lentes y 3 espejos recubiertos con oro)	
Magnificación lateral	0.4676 ± 0.0014	
Longitud focal efectiva	(8248 ± 3) mm	(16377 ± 7) mm
Relación focal F#	3.7434 ± 0.0016	4.6744 ± 0.0022
Escala de placa	(0.4456 ± 0.0022) arcsec/px	(0.2239 ± 0.0013) arcsec/px
FoV, lado	(31.65 ± 0.15) arcmin	(15.90 ± 0.09) arcmin
Calidad de imagen del modelo óptico D _{EE80}	(25.9 ± 0.6) μm = (1.44 ± 0.03) px (≤ 2 px)	(32.4 ± 0.8) μm = (1.80 ± 0.04) px (≤ 3 px)
Distorsión máx (esquina del campo de visión)	(1.332 ± 0.016) %	(1.381 ± 0.020) %
Hueco entre detectores: máx. 167 px	máx. 75 arcsec	máx. 38 arcsec
Diámetro de la imagen de pupila en el detector	(72.4 ± 0.9) mm	(55.7 ± 0.6) mm
Magnificación lateral pupila	0.754 ± 0.011	0.683 ± 0.009
Calidad imagen pupila, radio rms	(2.124 ± 0.003) mm	(1.547 ± 0.002) mm
Resolución de la imagen de pupila	(2.93 ± 0.04) %	(2.78 ± 0.05) %

Tabla 6–2: Prestaciones del diseño óptico construido de PANIC en sus condiciones de trabajo.

6.1.2. FILTROS DE CIENCIA

Según ya se ha mencionado, PANIC dispone de **cuatro ruedas de filtros** localizadas en la posición entre las lentes L8 y L9. La rueda **#1** es la más cercana a L8 (y por tanto, al telescopio) y la **#4** es la más cercana a L9 (es decir, al detector).

La disposición final de los elementos que pueblan las ruedas preparada para el comisionado del instrumento en telescopio se presenta en la Tabla 6–3. Además se incluye el filtro **Br-γ** que fue instalado en enero de 2016, un año después de la entrega de PANIC al observatorio de Calar Alto.

Esta disposición optimiza el uso de los filtros y minimiza el tiempo de cambio entre filtros. Las posiciones con "*Blank*" son posiciones ciegas que han de usarse cuando se toman exposiciones tipo "*dark*", bien en laboratorio, bien en telescopio durante operación del instrumento.

Las posiciones con "*dummy*" son posiciones en las que se ha instalado un disco de aluminio de peso igual al de un filtro para el correcto balance mecánico de la rueda. Dichos *dummies* son discos de aluminio que pueden ser desmontados para utilizar esas posiciones para nuevos filtros. En concreto, a fecha actual, hay posiciones para albergar ocho filtros de ciencia más.

Los parámetros construidos de los filtros de ciencia se listan en la siguiente Tabla 6–4. En rojo se enfatizan las no conformidades con respecto a su especificación de fabricación (ver Tabla 5–4). Con respecto a la no conformidad del paso de banda del filtro Z, resulta un filtro un poco más ancho, 0.002 μm, que es admisible para los casos científicos. Respecto a las dos no conformidades del espesor óptico, se confirma que el sistema construido puede admitir esas variaciones, ya que se produce una pequeña diferencia de enfoque que

es absorbible con el reenfoque entre filtros que se realiza con el espejo secundario del telescopio.

		Position					
		1	2	3	4	5	6
Rueda	#1	Y	H	PIL	Blank	J	Abierto
	#2	Z	Ks	Blank	H₂	dummy	Abierto
	#3	dummy	dummy	Blank	dummy	dummy	Abierto
	#4	dummy	Dummy	Blank	dummy	Br-γ	Abierto

Tabla 6–3: Disposición final de las ruedas de filtros de PANIC.

Filtro	$\lambda_{\text{cut-on}}$ (μm)	λ_c (μm)	$\lambda_{\text{cut-off}}$ (μm)	FWHM (μm)	T (%)	Espesor (mm)	Espesor óptico (mm)
Z	0.821	0.874	0.927	0.106	85	8.454 ± 0.002	12.267 ± 0.003
Y	0.971	1.023	1.075	0.105	75	8.420 ± 0.002	12.201 ± 0.003
J	1.169	1.247	1.326	0.157	84	8.390 ± 0.002	12.140 ± 0.003
H	1.495	1.638	1.780	0.285	93	8.360 ± 0.002	12.055 ± 0.003
K_s	1.986	2.150	2.314	0.328	95	8.367 ± 0.002	12.007 ± 0.003
H₂	2.101	2.118	2.135	0.034	93	8.380 ± 0.002	12.025 ± 0.003

Tabla 6–4: Parámetros de los filtros de ciencia construidos de PANIC en sus condiciones de operación.

A continuación la Imagen 6-1 muestra las curvas de transmisión del juego de filtros construidos de ciencia instalados en PANIC. Superpuesta a los anteriores, también se muestra la curva teórica de transmisión del cielo de CAHA, obtenida con KOPRA (The Karlsruhe Optimized and Precise Radiative transfer Algorithm) para una la altitud (2200 m) y unas condiciones medias de humedad relativa del 63.5% y de temperatura de 0 °C del observatorio. Cabe puntualizar la concordancia de la definición de los filtros con las ventanas de transmisión atmosférica en este rango del espectro.

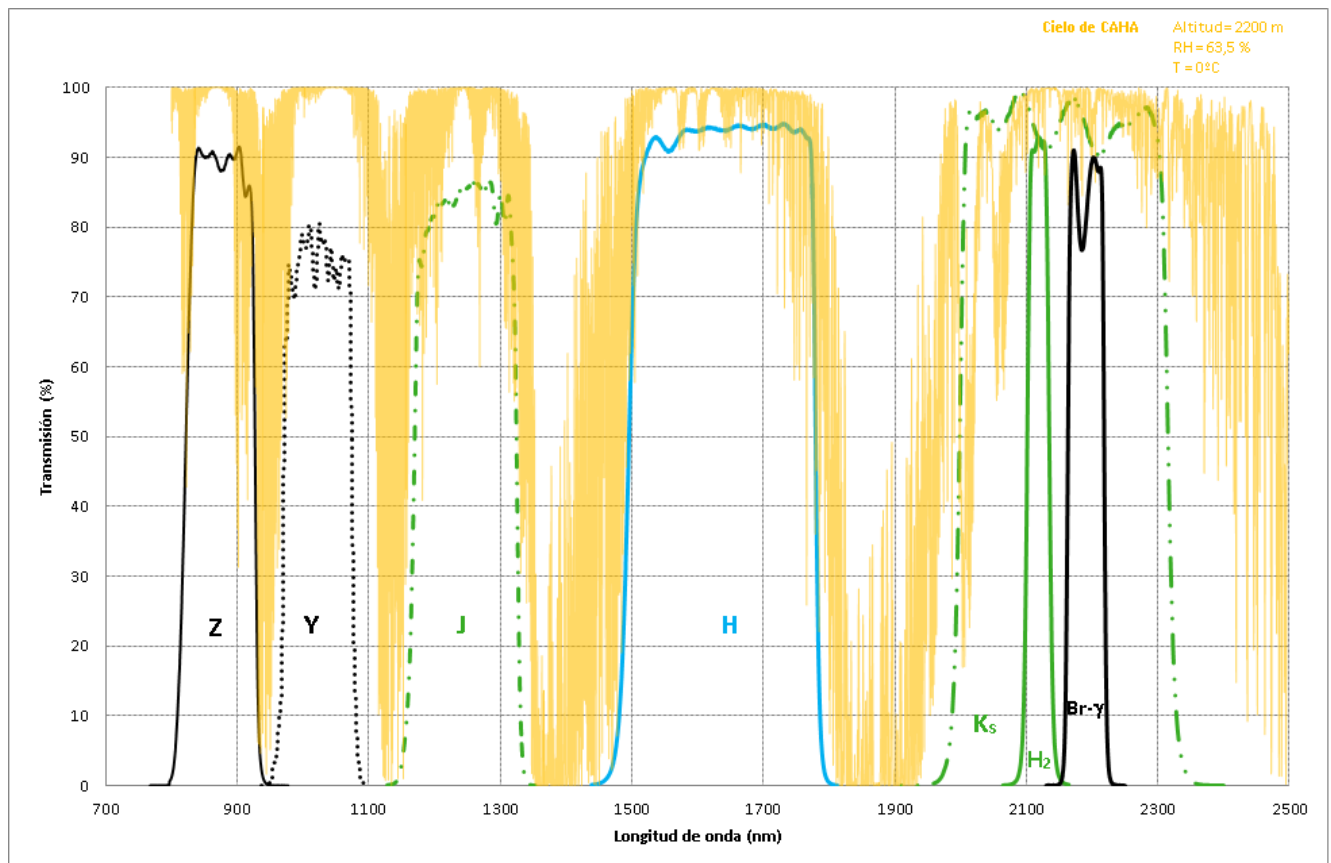


Imagen 6-1: Curvas de transmisión de los filtros instalados en PANIC. Las curvas son para las condiciones de operación del filtro (100 K y haz convergente). Se incluye la curva teórica del cielo de CAHA.

6.2. CALIDAD ÓPTICA EN LABORATORIO

Las pruebas de aceptación en laboratorio del instrumento consistían en la verificación de su calidad óptica. Dicha calidad óptica ha sido verificada con el SS y evaluada en términos del FWHM de la imagen en el detector para cada filtro de ciencia en varias localizaciones dentro de todo el campo de visión (según se explica en la sección 5.2.7).

La Tabla 5–8 compila los resultados exhaustivos de las medidas finales realizadas en laboratorio antes del transporte con PANIC en posición cenital para cada filtro. Con objeto de comparar los resultados de estas pruebas antes y después del transporte se toma como medida de la calidad de imagen, para cada filtro, el valor FWHM promedio en el FoV mostrado en dicha tabla. Así en la siguiente Tabla 6–5 se resumen los resultados de las medidas realizadas en laboratorio antes del desmontaje del instrumento previo a su transporte, tomados de la citada Tabla 5–8.

Asimismo se muestran aquí los resultados de la repetición de las mismas pruebas de calidad óptica en laboratorio realizados una vez reintegrado el instrumento después de su transporte y los valores de la calidad óptica esperada del modelo óptico construido correspondiente para esta configuración del sistema para su comparación. Además se muestran en la tercera columna los resultados de las medidas realizadas tras el accidente y la reparación (relatados en la sección 5.3.3). En todos los casos se verifica que las diferencias se encuentran por debajo de 0.1 px.

La Imagen 6-2 contiene la representación gráfica de estos resultados incluyendo sus barras de error. Se observa que la calidad óptica de la cámara es igual o mejor a la esperada por el modelo óptico, constatando por tanto que la calidad óptica se ha mantenido intacta tras el transporte y reintegración del instrumento, y autorizando así al montaje de la cámara en los telescopios.

Filtro de ciencia	SS+PANIC FWHM (px)			
	Modelo óptico	Medidas en laboratorio Antes de transporte	Medidas en laboratorio Después de transporte	Medidas en laboratorio Después del accidente
Z	1.24 ± 0.51	1.27 ± 0.41	1.36 ± 0.38	1.44 ± 0.28
Y	1.35 ± 0.45	1.48 ± 0.51	1.43 ± 0.35	--
J	1.48 ± 0.40	1.25 ± 0.26	1.39 ± 0.31	--
H	1.67 ± 0.34	1.51 ± 0.35	1.40 ± 0.35	--
K _s	1.64 ± 0.30	1.30 ± 0.20	1.42 ± 0.25	1.51 ± 0.15
H ₂	1.73 ± 0.30	1.32 ± 0.23	1.34 ± 0.32	--

Tabla 6-5: Calidad óptica de PANIC en el laboratorio y comparación con el modelo óptico, medidas antes y después de su transporte, y después del accidente.

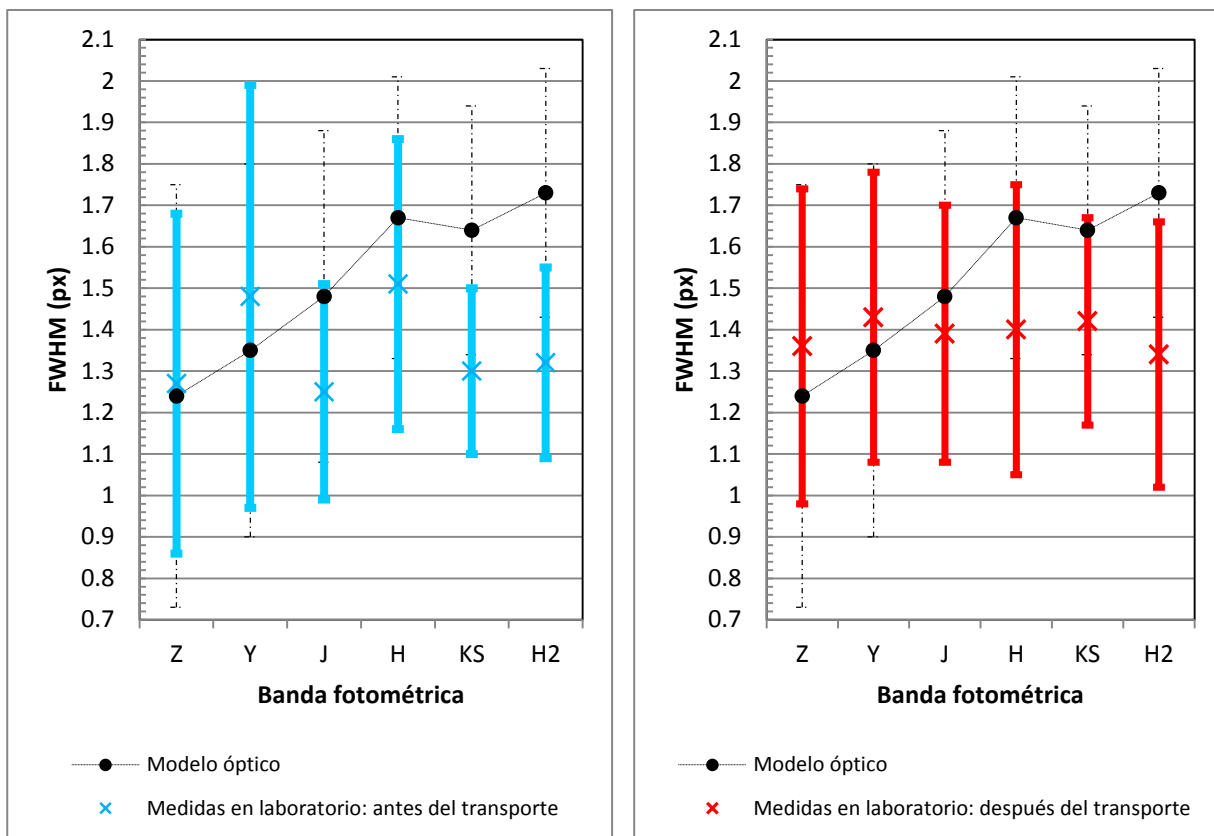


Imagen 6-2: Calidad óptica de PANIC medida en laboratorio en comparación con el modelo óptico: izqda. antes del transporte y dcha. después de transporte.

6.3. COMISIONADO EN AMBOS TELESCOPIOS

El comisionado es el proceso de verificación de que el instrumento ha sido puesto en funcionamiento con éxito, en nuestro caso en ambos telescopios, que cumple los requerimientos establecidos y que está listo para operación.

Las prestaciones obtenidas en cielo se resumen en las siguientes tablas, trabajando en el T22 (Tabla 6–6) y en el T35 (Tabla 6–7), donde los valores denotados con (M) han sido obtenidos por medida en imágenes de cielo, y los denotados con (D) deducidos por cálculo de los anteriores.

Telescopio	T22	
Prestación de PANIC	Esperado	Medido (M) Derivado de las medidas (D)
Magnificación lateral	0.4676 ± 0.0014	(D) 0.470 ± 0.020
Relación focal F#	3.7434 ± 0.0016	(D) 3.76 ± 0.17
Escala de placa	(0.4456 ± 0.0022) arcsec/px	(M) (0.4484 ± 0.0017) arcsec/px
FoV, lado	(31.65 ± 0.15) arcmin	(M) (31.67 ± 0.11) arcmin
Calidad de imagen del modelo óptico D_{EE80}	$(25.9 \pm 0.6) \mu\text{m} =$ (1.44 ± 0.03) px (≤ 2 px)	(D) ≤ 2 px
Distorsión máx (esquina del campo de visión)	(1.332 ± 0.016) %	(M) ≤ 0.73 %
Hueco entre detectores	≤ 167 px = 75 arcsec	(M) ~ 156 px = 70 arcsec
Diámetro de la imagen de pupila en el detector	(72.4 ± 0.9) mm	(M) ~ 71.5 mm

Tabla 6–6: Prestaciones de PANIC trabajando en el T22.

Telescopio	T35	
Prestación de PANIC	Esperado	Medido (M) Derivado de las medidas (D)
Magnitud limite	Estimación en fase de PDR: 23 (J), 21 (H) y 21 (K)	(D) 21.5 (J), 21.5 (H) y 21.0 (K) (3σ , 1 h, <i>seeing</i> 1.6 arcsec)
Relación focal F#	4.6744 ± 0.0022	(D) 4.70 ± 0.21
Escala de placa	(0.2239 ± 0.0013) arcsec/px	(D) (0.226 ± 0.009) arcsec/px
FoV, lado	(15.90 ± 0.09) arcmin	(D) (16.0 ± 0.8) arcmin
Calidad de imagen del modelo óptico D_{EE80}	$(32.4 \pm 0.8) \mu\text{m} =$ (1.80 ± 0.04) px (≤ 3 px)	(M) ≤ 2 px
Distorsión máx (esquina del campo de visión)	(1.381 ± 0.020) %	(D) ≤ 0.73 %
Hueco entre detectores: ≤ 167 px	38 arcsec	(D) ~ 156 px = 35 arcsec
Diámetro de la imagen de pupila en el detector	(55.7 ± 0.6) mm	(M) ~ 55.3 mm

Tabla 6–7: Prestaciones esperadas de PANIC trabajando en el T35.

A continuación se detallan las medidas y cálculos realizados para poblar estas dos tablas anteriores.

Una vez ajustado el alineado de la cámara con respecto a los telescopios (sección 5.3.2 y sección 5.3.3) se adquieren series de foco para cada filtro de ciencia, de nuevo, de campos poblados y cenitales. Las anteriores series de foco se procesan para obtener el mejor foco para cada filtro con ayuda de la herramienta de software *QuickLook* (Ibáñez

Mengual, 2017) que hace un ajuste gaussiano para la determinación del mejor foco en una serie de focal, como ya se ha mencionado. Una vez determinado el mejor foco se usan estas imágenes para validar las prestaciones de la cámara en telescopio.

En el T22 esto se realiza en diciembre de 2014, y en el T35 en mayo de 2015. Debido a la degradación del detector SG4, éste no se puede usar en la verificación de las prestaciones de la cámara dado que no se obtienen datos fiables.

Así se usan dichas imágenes para:

- 1) determinar el tamaño de la imagen obtenida con PANIC en condiciones medias de *seeing*,
- 2) deducir la calidad óptica de PANIC,
- 3) estimar la magnitud límite de la cámara,
- 4) medir el FoV,
- 5) calcular la escala de placa,
- 6) hacer una evaluación de la distorsión geométrica del campo y
- 7) hacer una estimación del hueco real entre detectores.

También se toman imágenes en el modo de reimaginación de pupila con el filtro K_s durante la observación nocturna, con el telescopio apuntando a una estrella cenital y poniendo ésta en el centro del campo de PANIC, en el hueco central entre los detectores, para tener una iluminación uniforme del espejo primario. Estas imágenes se usan para:

- 8) verificar el tamaño de la imagen de pupila.

1) Tamaño de la imagen obtenida con PANIC en condiciones medias de *seeing*.

Las imágenes en foco corregidas de *dark*, de *flat* y de *bad pixels*, se analizan y se computa el tamaño de las estrellas mediante su FWHM. Para cada filtro de ciencia se toma el promedio del tamaño de las estrellas en todo el campo de visión de la cámara como medida del tamaño de la imagen obtenida con PANIC.

Los resultados de estas medidas para el T22 se presentan en la Tabla 6–8 en la columna “Medido”. Y, análogamente, para el T35 en la Tabla 6–9.

El tamaño FWHM de las imágenes promediando en todos los filtros está por debajo de los 1.1 arcsec en el T22 y de los 0.8 arcsec en el T35, en imágenes tomadas cuando el *seeing* atmosférico tiene un valor en torno a 1 arcsec en la banda **V**.

2) Dedución de la calidad óptica de PANIC.

La calidad óptica del diseño construido resultante en *Zemax* para cada banda fotométrica y en términos de la D_{EE80} en μm se detalla en la Tabla C–16 para el T22 y en la Tabla C–17 para el T35. Para poder adicionar el efecto del *seeing* al modelo óptico es útil expresar dichas tablas en términos del FWHM (mediante la ecuación [3.20]) y en arcsec (teniendo en cuenta la escala de píxel del diseño construido (Tabla 6–2) y que el píxel tiene un tamaño de 18 μm). El resultado de este cálculo se presenta en la Tabla 6–8 en la columna “T22+PANIC Modelo óptico”. Y, análogamente, para el T35 en la Tabla 6–9.

Durante la toma de estas series de foco el *seeing* atmosférico era en torno a 1 arcsec en la banda **V**. Es importante apuntar dos aspectos de este valor del *seeing*. El primero es

que su valor es variable en el tiempo y el segundo que es medido en la banda V. Se supone para estos cálculos que un *seeing* constante e igual a 1.1 arcsec en la campaña técnica de verificación en el T22, y de 1 arcsec en la del T35.

Conocido el *seeing* en la banda **V** se extrapola para las longitudes de onda centrales de los filtros de PANIC usando la relación dada por la ecuación [3.22]. El valor así calculado se suma cuadráticamente al FWHM del modelo óptico obteniendo el valor esperado a medir con estrellas de cielo. Los resultados de estos cálculos se exponen en la Tabla 6–8 en la columna “*Seeing*+T22+PANIC, Esperado”. Y, análogamente, para el T35 en la Tabla 6–9.

En el caso del T22 (Tabla 6–8), restando cuadráticamente el valor medido y el esperado se obtiene la desviación del modelo óptico en términos del FWHM, que trasladado a D_{EE80} resulta en una calidad óptica de PANIC de una D_{EE80} menor a **0.9 arcsec** requeridos en todos los filtros.

En el caso del T35 (Tabla 6–9), el valor medido en cielo es en todos los filtros menor que el esperado, de forma que es evidente que el sistema cumple el requerimiento de una D_{EE80} menor a **0.69 arcsec** al no producir degradación en la imagen.

Banda fotométrica	T22 + PANIC Modelo óptico	<i>Seeing</i> * + T22 + PANIC	
		Esperado	Medido
FWHM (arcsec)			
Z	0.27	1.04	1.14
Y	0.26	1.00	1.07
J	0.30	0.98	1.14
H	0.37	0.96	1.12
K_s	0.48	0.97	1.06

Tabla 6–8: Tamaño de la imagen de PANIC en las observaciones con el T22 y comparación con el esperado por el modelo óptico construido.

Banda fotométrica	T35 + PANIC Modelo óptico	<i>Seeing</i> † + T35 + PANIC	
		Esperado	Medido
FWHM (arcsec)			
Z	0.18	0.93	0.87
Y	0.18	0.90	0.76
J	0.20	0.87	0.74
H	0.23	0.84	0.71
K_s	0.29	0.81	0.76

Tabla 6–9: Tamaño de la imagen de PANIC en las observaciones en el T35 y comparación con el esperado por modelo óptico construido.

Una vez comprobado que el sistema tiene la calidad óptica esperada, cabe mencionar que dados los valores estimados del tamaño de la imagen a observar, para realizar medidas exhaustivas de la calidad óptica del sistema sería necesario realizar campañas de observación con condiciones de *seeing* de valores menores a 0.9 arcsec, para el T22, y para el T35, por debajo de los 0.8 arcsec.

Durante las campañas de comisionado de la cámara no se dieron estas condiciones de *seeing*, de forma que se puede plantear realizar estas pruebas en el futuro tras la puesta en funcionamiento de PANIC con el nuevo detector.

* *Seeing* de 1.1 arcsec en la banda **V**

† *Seeing* de 1 arcsec en la banda **V**

3) Estimación de la magnitud límite de la cámara.

El equipo científico de PANIC ha realizado una primera estimación de las magnitudes límite de la cámara usando datos de las diversas campañas de observación en el T35 realizadas con posterioridad al comisionado. Debido al estado del SG4 y del SG3 esta estimación preliminar de la magnitud límite es demasiado conservadora y no ha sido publicada al no ser valores finales que puede proporcionar este instrumento. En todo caso, y después del cambio al nuevo detector del instrumento, estas magnitudes serán determinadas de nuevo con mayor precisión, y se esperan obtener valores aún más profundos (magnitudes límite mayores).

Por otro lado, la magnitud límite de un instrumento depende principalmente de tres factores: de la oscuridad del cielo, de la transparencia de la atmósfera y del sistema óptico (en este caso telescopio+cámara). Esta caracterización exhaustiva no es la que ha calculado el equipo científico, sino tan solo una medida de la profundidad a la que se puede llegar en la cámara en condiciones estándares de observación.

En la Tabla 6–10 se han introducido estos valores preliminares calculados, que aseguran, en las condiciones actuales del FPA, que la cámara puede llegar a una magnitud de hasta 21 en las bandas **J**, **H** y **K**.

Para comparar a grosso modo estos números con otras cámaras, se incluye también en la Tabla 6–10 valores de las cámaras infrarrojas de gran campo actualmente en operación así como los parámetros de la toma de estas medidas. Esos valores son públicos y han sido obtenidos de las páginas web de las citadas cámaras. Dado que no hay un estándar definido para la determinación de la magnitud límite en el infrarrojo, hay que tomar estos valores tan solo como indicativos.

En la nota técnica titulada “*Signal to Noise cases*” (Sánchez-Blanco, Cárdenas Vázquez, & Fernández, *Signal to Noise cases*, 2007, March) presentada en PDR del instrumento se hizo un estudio preliminar de las magnitudes límite a las que podría llegar un instrumento con las características de PANIC. En dicho estudio se concluyó que la cámara podría llegar a magnitud 23 en **J**, 21 en **H** y 21 en **K**.

Estos resultados confirman que la combinación de materiales ópticos de las lentes, sus grosores y sus recubrimientos antirreflejantes, así como el recubrimiento reflectivo de oro practicado a los espejos de doblado, ha sido muy idóneo para lograr una alta transmisión óptica en el rango espectral de trabajo.

Instrumento	Magnitud límite					Parámetros de medida
	Z	Y	J	H	K	
NEWFIRM	-	-	20.5	19.7	19.0	3 σ , 60 s
WFCAM	20.7	20.1	19.5	18.9	18.2	5 σ , 40 s, <i>seeing</i> 0.6 arcsec
WIRCAM	-	23.5	22.7	21.8	21.4	5 σ , 1 h, <i>seeing</i> 0.7 arcsec
PANIC	-	-	21.5	21.5	21.0	3 σ , 1 h, <i>seeing</i> 1.6 arcsec

Tabla 6–10: Magnitudes límite de las cámaras infrarrojas de gran campo actualmente en operación.

Para la verificación de los puntos **4)** a **7)** en el T22 se usan imágenes del filtro J obtenidas en el T22. Sin embargo, en el T35 el proceso de verificación de estas mismas prestaciones de PANIC se realizan por deducción de las obtenidas en el T22.

4) Medida del FoV.

Las imágenes generadas por PANIC son procesadas de manera automática por PAPI (PANIC Pipeline (Ibáñez Mengual, 2017)) que es el software de procesamiento automático de imágenes creado para PANIC y que está formado por una secuencia de programas escritos en *Python* y diversos paquetes asociados como *Astropy* y *PyRAF*. Dentro de esta secuencia de programas, en la fase de astrometría, se puede usar el software proporcionado por Astrometry.net ((Astrometry.net) y (Lang, Hogg, Mierle, Blanton, & Roweis, 2010)) o bien SCAMP (Bertin, 2006). De forma general, una vez se ha restado el cielo a las imágenes individuales de una secuencia de *dithering*, se le aplica una astrometría inicial usando en este caso Astrometry.net, y 2MASS (The Two Micron All Sky Survey at IPAC, 2003) como catálogo de referencia, con objeto de realizar un alineado posterior de las imágenes individuales.

Los estimación del FoV y de la escala de píxel que se reflejan en esta memoria de tesis se han realizado usando dicha astrometría inicial de Astrometry.net, que además proporciona los coeficientes de distorsión geométrica no-lineal, representados en la cabecera de las imágenes con el formato SIP (Shupe, et al., 2005). Una vez calibradas astrométricamente, se han usado las utilidades de "astropy.wcs" para la transformación de coordenadas de detector (x,y) a coordenadas de cielo (habilitando o deshabilitando el uso de los coeficientes SIP de distorsión) y el posterior cálculo de la separación angular (*astropy.coordinates.SkyCoord*) entre dichas coordenadas de cielo obtenidas.

Con la corrección de distorsión habilitada en la calibración astrométrica, se mide la separación angular horizontal entre los laterales exteriores de los detectores SG3 y SG2 a tres alturas, y la separación vertical entre los laterales exteriores de los detectores SG2 y SG1, también en tres puntos equidistantes. En la Imagen 6-3 se muestra la localización de estos puntos en el mosaico de detectores.

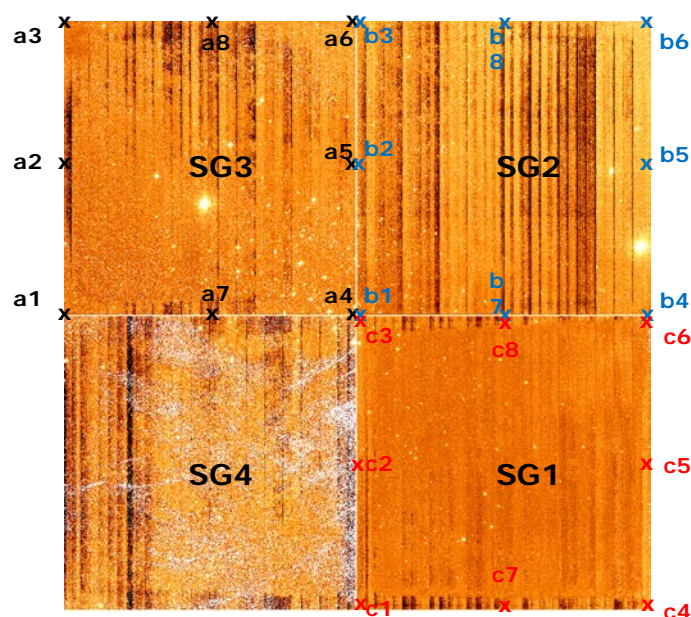


Imagen 6-3: Puntos de medida establecidos en el PFA para la verificación de las prestaciones de la cámara.

El valor medio de estos campos de visión se promedia y se toma como la estimación del FoV (ecuación [6.1]) y su desviación estándar como su error.

$$FoV_{PANIC@T22} = \frac{|a1-b4|+|a2-b5|+|a3-b6|+|b3-c1|+|b8-c7|+|b6-c4|}{6} = (31.67 \pm 0.11) \text{ arcmin} \quad [6.1]$$

5) Cálculo de la escala de placa.

Debido a la distorsión geométrica de la cámara la escala de placa no es constante a lo largo del campo de visión. El objetivo de estas pruebas es la verificación de las prestaciones de la cámara y no una caracterización exhaustiva que, si fuera necesaria, la hará el equipo científico que use la cámara llegado el momento.

Así pues, para la determinación de la escala de placa se usan las mismas imágenes que para la medida del FoV, pero ahora con la corrección de distorsión deshabilitada en la calibración astrométrica. Se mide la separación angular horizontal entre los extremos horizontales y verticales de los detectores SG3, SG2 y SG1. Los valores así obtenidos son los FoVs horizontales y verticales de cada detector individual. El valor de estos campos de visión por detector se promedia y se toma como la estimación del FoV por detector (ecuación [6.2]) y su desviación estándar como su error.

$$FoV_{SGi@T22} = \frac{|a2-a5|+|a7-a8|+|b2-b5|+|b7-b8|+|c2-c5|+|c7-c8|}{6} = (15.30 \pm 0.06) \text{ arcmin} \quad [6.2]$$

Usando que cada detector tiene 2048 px (apéndice A) y despejando la escala de píxel de la ecuación [3.4]) se obtiene:

$$EP_{PANIC@T22} = \frac{FoV_{SGi@T22}}{2048 \text{ px}} = (0.4484 \pm 0.0017) \text{ arcsec/px} \quad [6.3]$$

Sabiendo ahora la escala de placa se puede deducir la magnificación lateral de la cámara y su relación focal, para compararla con el modelo óptico.

La magnificación lateral se puede calcular usando la ecuación [3.7] y sabiendo que escala de placa del telescopio es $(11.712 \pm 0.020) \text{ arcsec/mm}$ (ecuación [4.2]):

$$m_{PANIC@T22} = \frac{EP_{T22}}{EP_{PANIC@T22}} = (0.470 \pm 0.020) \quad [6.4]$$

La relación focal, con la misma ecuación [3.7] y teniendo en cuenta que la relación focal del T22 es 8.005 ± 0.021 (ecuación [4.1]) y del T35 es 10.000 ± 0.017 (apéndice B, Tabla B-1):

$$F\#_{PANI@T22} = m_{PANI@T22} \cdot F\#_{T22} = (3.76 \pm 0.17) \quad [6.5]$$

$$F\#_{PANI@T35} = m_{PANI@T22} \cdot F\#_{T35} = (4.70 \pm 0.21) \quad [6.6]$$

Se puede calcular la escala de placa en el T35, sabiendo la magnificación de la cámara (ecuación [6.4]), usando la ecuación [3.7]:

$$EP_{PANIC@T35} = \frac{EP_{T35}}{m_{PANIC@T22}} = (0.226 \pm 0.009) \quad [6.7]$$

6) Evaluación de la distorsión geométrica del campo.

Con los datos de las coordenadas a1-a8, b1-b8 y c1-c8, con distorsión habilitada (punto 4)) y deshabilitada (punto 5)), se puede calcular la distorsión geométrica de la imagen en cada punto mediante el siguiente cociente:

$$\text{distorsión}_{\text{PANIC@T22}} = \frac{|a3_{\text{distorsión_ON}} - a3_{\text{distorsión_OFF}}|}{a3_{\text{distorsión_ON}}} \quad [6.8]$$

donde se ha escrito la expresión para el caso del punto a3.

Calculando para todos los puntos mostrados en la Imagen 6-3 se obtiene que la distorsión máxima es del 0.73 %.

Para el caso de PANIC instalada en el T35 se estima que la distorsión será del mismo orden de magnitud o incluso un poco menor, ya que al tener PANIC un campo de visión menor cuando trabaja en este telescopio, la calidad óptica del propio telescopio es un poco mejor que el T22.

7) Estimación del hueco real entre detectores.

El diseño óptico ha tenido en cuenta el caso más desfavorable en el que el hueco máximo entre detectores sea de 167 px. Sin embargo, el fabricante de los detectores no proporcionó este dato en el mosaico construido.

Se puede hacer una estimación con estas mismas imágenes, de los valores de los puntos muestreados con distorsión deshabilitada, y haciendo la diferencia entre los siguientes valores del campo total y el campo de cada detector.

$$\text{Hueco-Horizontal} = |a2-b5| - |a2-a5| - |b2-b5| = 155.74 \text{ px} \quad [6.9]$$

$$\text{Hueco-Vertical} = |c7-b8| - |c7-c8| - |b7-b8| = 157.12 \text{ px} \quad [6.10]$$

Se toma el valor medio entre ambos como valor estimado del hueco y su error la desviación estándar.

$$\text{Hueco entre detectores} = 156 \pm 1 \text{ px} \quad [6.11]$$

Por último, averiguado el hueco entre detectores, el FoV en el T35 puede ser calculado usando la ecuación [3.4]:

$$\text{FoV}_{\text{PANIC@T35}} = \text{EP}_{\text{PANIC@T35}} \cdot (4096 + 156) \text{ px} = (16.0 \pm 0.8) \text{ arcmin} \quad (6.12)$$

8) Verificación el tamaño de la imagen de pupila.

Se mide el tamaño de la imagen de la pupila (imagen del espejo primario del telescopio a través del modo de reimaginación de pupila) formada en el mosaico de detectores usando la Imagen 5-76 para el T22 y la Imagen 5-79 para el T35. Los resultados se han introducido en la Tabla 6-6 y la Tabla 6-7, respectivamente.

6.4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Sistema construido

- El diseño óptico presentado y aprobado en FDR cumple todos los requerimientos. En la Tabla 4–10 se expone que todos los requerimientos son alcanzados, y en la Tabla 6–1 se resumen las prestaciones obtenidas del diseño óptico final de PANIC trabajando en ambos telescopios. Como consecuencia de ello el informe de los revisores de FDR es favorable y el proyecto pasa a la fase de fabricación.
- Tras las iteraciones con los fabricantes y el ensamblaje y alineado del instrumento, el diseño óptico construido de PANIC sigue cumpliendo todos los requerimientos. En la Tabla 6–2 se listan las prestaciones obtenidas de tal sistema trabajando en ambos telescopios, donde no solo se consiguen los mismos valores de prestaciones que el diseño de FDR, sino que además, en el sistema construido los márgenes de error son menores al haber sido introducidos todos los valores reales medidos después de la construcción de los elementos ópticos.
- Los filtros de ciencia construidos de PANIC cumplen sus especificaciones de fabricación para sus condiciones de operación. Sus parámetros construidos se listan en la Tabla 6–4 y sus curvas de transmisión se grafican en la Imagen 6-1.

Calidad Óptica en Laboratorio

- Las pruebas finales de calidad óptica realizadas en laboratorio con el simulador de estrella antes del transporte se presentan en la Tabla 5–8 y más condensadas en la Tabla 6–5. El tamaño de las imágenes medido es siempre menor que el tamaño predicho por el modelo óptico, salvo algún punto aislado en el filtro **Z** y filtro **Y**, pero aún en estos caso la desviación es del orden de 0.1 px.
- Además las imágenes no presentan anomalías en la forma de la imagen, de forma que se puede concluir que no hay presencia de aberraciones de fuera de eje en el sistema óptico de PANIC.
- Asimismo estos resultados ponen de manifiesto que la estrategia de compensación durante la fase de integración y alineado en laboratorio ha funcionado. Recordemos que dicha estrategia incluye dos compensadores mecánicos de posicionado en el eje Z (uno en LM2 y otro en LM3) y otros dos de descentrado en los ejes X e Y (de nuevo uno en LM2 y otro en LM3).
- Las medidas de la variación del tamaño de la imagen para diferentes inclinaciones de PANIC revelan que el FWHM medio en todo el plano focal resultante es de 1.46 ± 0.2 px, concluyendo que no hay un cambio en la calidad de imagen debido a la inclinación de la cámara durante su operación en telescopio.
- Los resultados de la repetición de las mismas pruebas de calidad óptica en laboratorio, con el simulador de estrella, realizadas una vez reintegrado el instrumento después de su transporte (también presentados en la Tabla 6–5)

constatan que el alineado óptico del instrumento se ha preservado después de su transporte y re-ensamblaje, así como tras el accidente sufrido.

- La Imagen 6-2 contiene la representación gráfica de estos resultados incluyendo sus barras de error. Se observa que la calidad óptica de la cámara es igual o mejor a la esperada por el modelo óptico, constatando por tanto que la calidad óptica se ha mantenido intacta tras el transporte y reintegración del instrumento, y autorizando así al montaje de la cámara en los telescopios.
- Además se ha comprobado la robustez del sistema y de su alineado del sistema que se ha preservado tras los transportes realizados del instrumento entre los edificios del T35 y T22, y tras el accidente sufriendo impacto, descompresión y calentamiento rápido, explicado en la sección 5.3.3.

Comisionado en ambos Telescopios

- Las prestaciones de la cámara quedan verificadas con las medidas realizadas en telescopio durante su comisionado en ambos telescopios. La Tabla 6–6 refleja los valores obtenidos para el T22 y la Tabla 6–7 para el T35.
En ambos telescopios la escala de placa y el campo de visión se corresponden completamente al valor esperado por el modelo óptico construido.
Además el valor de la distorsión geométrica medida, 0.73 %, es mucho menor a la predicha del 1.4 % por *Zemax*, resultando una situación real mejor a la esperada.
Igualmente el resto de prestaciones, como son la magnificación lateral del sistema óptico, su relación focal se satisfacen en ambos telescopios.
- El tamaño de la imagen obtenida con PANIC está por debajo de los 1.15 arcsec en el T22 (Tabla 6–8) y de los 0.9 arcsec en el T35 (Tabla 6–9), para todas las bandas espectrales y en condiciones medias de *seeing* atmosférico de 1 arcsec en la banda **V**.
- La calidad óptica de PANIC que se puede deducir de las imágenes de cielo tomadas en condiciones de un *seeing* de 1 arcsec (banda **V**) nos muestran que, en el T22 la D_{EE80} requerida menor que $2 \text{ px} = 0.9 \text{ arcsec}$ se cumple en todos los filtros.
En el caso del T35 (Tabla 6–9), el valor medido en cielo es en todos los filtros menor que el esperado, de forma que es evidente que el sistema cumple el requerimiento de una D_{EE80} menor que $3 \text{ px} = 0.69 \text{ arcsec}$, al no producir degradación en la imagen. Por tanto, se toma en este telescopio como calidad óptica la predicha por el modelo construido que es menor a 2 px.
Para realizar medidas exhaustivas de la calidad óptica límite del sistema sería necesario realizar campañas de observación con condiciones de *seeing* de valores menores a 0.9 arcsec, para el T22, y para el T35, por debajo de los 0.8 arcsec.
- Las estimaciones preliminares de la magnitud límite de la cámara, realizadas con los detectores degradados arrojan los siguientes valores: 21.5 (**J**), 21.5 (**H**) y 21.0 (**K**), para 3σ , 1 h, *seeing* 1.6 arcsec. Estos valores son conservadores, y por tanto, con el nuevo detector se espera alcanzar magnitudes límite mayores.
No obstante PANIC disfruta de valores similares a los que reportan otras cámaras infrarrojas de gran campo (Tabla 6–10) y que se corresponden con los esperados

por el equipo del instrumento, según los análisis realizados en la fase de PDR del mismo que pronosticaba llegar a magnitud 23 en **J**, 21 en **H** y 21 en **K**.

Estos resultados confirman que la cámara tiene una alta transmisión óptica en el rango espectral de trabajo.

- La estimación preliminar del hueco entre detectores de $156 \text{ px} = 2.8 \text{ mm}$, concuerda con el margen dado por el fabricante del mosaico que preveía un hueco entre 2.5 y 3 mm (siendo estos 3 mm los 167 px para los que se ha realizado el sistema óptico).
- El modo de reimaginación de pupila es una herramienta muy eficaz para la verificación del alineado del espejo primario (pupila de entrada del sistema) con el diafragma de apertura frío (localizado en la rueda de pupilas).

Se ha comprobado su correcto funcionamiento en operación, obteniendo una imagen del espejo primario del tamaño predicho por el modelo óptico y con bordes suficientemente nítidos tales que permiten la realización de dicho alineado

7. CONCLUSIONES

A continuación se enumeran las principales conclusiones que pueden extraerse del trabajo presentado:

- Se ha realizado el diseño óptico de la cámara infrarroja de gran campo PANIC, pasando por su fase preliminar, fase final, fase diseño iteración con fabricantes y diseño construido.
- El diseño cumple todos los requerimientos y especificaciones, tanto científicas como técnicas.
- Los mayores retos abordados y solucionados en el diseño han sido:
 - La corrección de las aberraciones ópticas fuera de eje, debido al gran campo de visión.
 - La corrección de la aberración cromática debido al extenso rango espectral.
 - La compatibilidad de trabajar con filtros astronómicos estrechos (~1%).
 - Las ligaduras mecánicas impuestas por trabajar en el foco *Cassegrain* del telescopio, tanto en tamaño como en peso del instrumento, y por tanto de la óptica.
 - Las ligaduras mecánicas impuestas a la geometría de las lentes que debían tener chaflanes a ambos lados de su perímetro, debido al diseño de la montura opto-mecánica.
 - La capacidad de trabar en los telescopios T22 y T35.
 - La implementación del diafragma de apertura frío (para ambos telescopios) y del diafragma de campo también frío.
- El instrumento ha sido construido, integrado, alineado y verificado en laboratorio.
 - La estrategia de compensación durante la fase de integración y alineado en laboratorio se ha demostrado que funciona, pues el sistema cumple la calidad óptica esperada en las medidas de laboratorio.
 - Además el alineado se ha preservado tras su desmontaje y reensamblaje, según ha quedado patente tanto en las pruebas de calidad de imagen en laboratorio como por su prestación en telescopio.
 - La cámara dispone de una herramienta para la verificación del alineado del espejo primario (pupila de entrada del sistema) con el diafragma de apertura frío (localizado en la rueda de pupilas) mediante el modo de reimaginación de la pupila al introducir la PIL en el camino óptico principal.
- El instrumento ha sido alineado y ajustado en ambos telescopios.
- La cámara ha sido comisionada y verificadas sus prestaciones en ambos telescopios cumpliendo todos los requerimientos científicos, y quedando lista para operación científica.
- Se ha publicado un artículo recopilatorio (Cárdenas Vázquez, et al., 2018) describiendo el instrumento desde un punto de vista técnico detallado y de sus prestaciones en telescopio en *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*.

- El instrumento PANIC ha sido aceptado provisionalmente por el observatorio.

La aceptación provisional ha sido solo debido al cambio de detector que se hará en un futuro próximo. Todos los paquetes del instrumento, Electrónica, Mecánica, Óptica, Software de control y Software de procesamiento de datos, han cumplido sus requerimientos y han demostrado su buen funcionamiento. Los detectores, sin embargo, presentan fallos insalvables que hacen necesaria su sustitución.

- PANIC es la primera cámara infrarroja de gran campo en el hemisferio norte que pertenece a la comunidad astronómica hispano-alemana.

- La doctoranda, gracias a los conocimientos adquiridos durante el desarrollo de este proyecto, ha podido abordar otros proyectos instrumentales de instrumentación astronómica infrarroja.

En particular, como consecuencia del trabajo descrito en esta memoria, ha sido responsable del paquete de Óptica del canal infrarrojo del espectrógrafo de alta resolución CARMENES (*Calar Alto high-Resolution search for M dwarfs with Exoearths with Near-infrared and optical Échelle Spectrographs*, (CARMENES)), desde la fase de PDR del instrumento hasta su comisionado en el Observatorio de Calar Alto. Su contribución total en tiempo abarcó desde julio de 2009 hasta diciembre de 2015, y como en el caso de PANIC, sus tareas comprendieron tanto diseño óptico como AIV del instrumento, en laboratorio y en telescopio. Éste es el segundo instrumento que se ha desarrollado dentro del convenio CSIC-MPG, siendo el canal infrarrojo desarrollado y responsabilidad del IAA.

Otro ejemplo de desarrollo instrumental es su actual trabajo en el instrumento METIS (*Mid-infrared ELT Imager and Spectrograph*, (METIS)) que se encuentra ahora en su fase de PDR y del que la doctoranda es responsable de los dos paquetes de Óptica que lidera el MPIA, uno es una cámara infrarroja que cubre el rango espectral desde 3 a 19 μm , y otro un sensor de frente de onda piramidal y que opera en el infrarrojo cercano (de 1 a 2.5 μm).

Trabajo futuro

Respecto a trabajo futuro en este instrumento, cabe señalar, como se ha mencionado en esta memoria de tesis, que el nuevo proyecto de renovación del mosaico actual de detectores por uno nuevo ha comenzado durante este año 2018.

El pasado mes de agosto de 2018 se procedió al desmontaje de la cámara en la sala limpia del Observatorio de Calar Alto para su transporte al MPIA. Durante el mes de septiembre se ha vuelto a reensamblar en los laboratorios del MPIA y la cámara se encuentra ahora a la espera de la implementación del nuevo detector. Éste será monolítico, un HAWAII-4RG compuesto por una matriz de 4096×4096 píxeles con un tamaño de píxel de 15 μm , del que ya se ha realizado la orden de compra y que se espera recibir en septiembre de 2019.

El nuevo detector tiene un tamaño de píxel menor, 15 μm , en comparación con las 18 μm del antiguo detector. Usando la escala de placa obtenida en ambos telescopios (Tabla 6–6 y Tabla 6–7) y refiriéndola al nuevo tamaño de píxel, se obtienen los valores presentados en la Tabla 7–1.

Por otro lado, usando estas escalas de placa para el nuevo píxel y sabiendo que el lado del detector tiene 4096 píxeles, se calcula el FoV que PANIC tendrá cuando trabaje con el nuevo detector y en ambos telescopios (Tabla 7–1).

Al ser monolítico y no tener hueco ninguno, el tamaño físico del detector es de 61.44 mm, en comparación con los 76.54 mm del antiguo. En consecuencia la óptica de la cámara proporciona un haz mayor al tamaño del nuevo detector, pues está diseñada para un mayor campo de visión.

Cabe destacar que aún con el nuevo y menor tamaño de píxel, el modelo óptico construido de la cámara predice que seguirá cumpliendo el requerimiento de que la D_{EE80} quede encerrada en 2 píxeles, en el T22, y en 3 píxeles, en el T35.

Prestaciones de PANIC		
Parámetro	T22	T35
Detector infrarrojo monolítico	Matriz de 4096 × 4096 px, 15 μm, HAWAII-4RG, con <i>cut-off</i> en 2.5 μm	
Escala de placa	(0.3737 ± 0.0014) arcsec/px	(0.118 ± 0.008) arcsec/px
FoV, lado	(25.5 ± 0.1) arcmin	(12.8 ± 0.5) arcmin
Calidad de imagen del modelo óptico D_{EE80}	(25.9 ± 0.6) μm = (1.73 ± 0.04) px (≤ 2 px)	(32.4 ± 0.8) μm = (2.16 ± 0.05) px (≤ 3 px)

Tabla 7–1: Prestaciones del diseño óptico construido de PANIC en sus condiciones de trabajo.

Tras la recepción del nuevo detector, su puesta en funcionamiento óptimo y su caracterización, se planea, por tanto, para la doctoranda la instalación del nuevo detector y su ajuste en su posición óptima de foco, con las iteraciones criogénicas necesarias, la realización de las pruebas de calidad de imagen con el simulador de estrella, de nuevo, antes y después de transporte, y, por último su verificación en telescopio.

Por otro lado, otro trabajo futuro a realizar cuando se encuentre la cámara operativa en CAHA con el nuevo detector, y el equipo científico determine las magnitudes límite reales y la relación señal-ruido en la banda **K**, es la evaluación de si es necesaria la realización de un alineado fino del diafragma de apertura frío (localizado en la rueda de pupilas) con el espejo primario para ambos telescopios. Para ello se puede usar el modo de reimaginación de pupila y calcular el descentrado a implementar en la máscara del diafragma de apertura, en particular en la dirección NORTE-SUR, para fabricar dicha máscara e instalarla en la rueda de pupilas. Trabajo que no se pudo hacer con el antiguo mosaico de detectores debido a la degradación referida.

Por último, con PANIC de nuevo operativa en el observatorio se puede planear medir en cielo la calidad óptica límite mediante la obtención de imágenes bajo condiciones de *seeing* atmosférico con valores por debajo a los 0.9 arcsec, para el T22, y para el T35, de los 0.8 arcsec (según se mencionó en la sección 6.3).

BIBLIOGRAFÍA

- *"Handbook of Optical Design"*, D. Malacara, Z. Malacara, Ed. Marcel Dekker, Inc., 2nd Edition, 2004.
- *"Handbook of Optics"*, Volume I, Ed. Michael Bass, McGraw-Hill Inc., 2nd Edition, 1995.
- *"Modern Optical Engineering, The Design of Optical Systems"*, J. Smith Warren, Ed. McGraw-Hill, 4th Edition, 2008.
- *"OPTICA"*, Justiniano Casas, Ed. GRAFICAS LIBRERIA GENERAL, 1994.
- *"Optical System Design"*, Rober E. Fischer, Biljana Tadic-Galeb, Paul R. Yoder, SPIE Press, McGraw-Hill, 2nd Edition, 2008.
- *"Optical Shop Testing"*, D. Malacara, Ed. John Wiley & Sons, Inc., 3rd Edition, 2007.
- *"Opto-Mechanical Systems Design"*, Paul R. Jr. Yoder, Ed. SPIE Press, Taylor & Francis, 2006.

REFERENCIAS

Las Notas Técnicas del Proyecto PANIC referenciadas en esta memoria de tesis pueden ser distribuidas por la doctoranda a petición del interesado.

Astrometry.net. (s.f.). Obtenido de <http://astrometry.net/>

Atad, E., Bizenberger, P., & Baffa, C. (2008). *Report of the Panoramic IR Camera (PANIC) Project FDR OPTICS Review Committee*.

Baumeister, H., Bizenberger, P., Bayler-Jones, C. A., Kovacs, Z., Roeser, H., & Rohloff, R.-R. (2002). Cryogenic engineering for OMEGA2000: design and performance. *Proc. SPIE 4841, Instrument Design and Performance for Optical/Infrared Ground-based Telescopes*. Waikoloa, Hawaii, United States. doi:doi.org/10.1117/12.461003

Beletic, J. W., Blank, R., Gulbransen, D., Lee, D., Loose, M., Piquette, E. C., . . . Zino, J. (2008). Teledyne Imaging Sensors: infrared imaging technologies for astronomy and civil space. *Proc. SPIE, Volume 7021, High Energy, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy III*. Marseille.

Bertin, E. (2006). Automatic Astrometric and Photometric Calibration with SCAMO. *ASP Conference Series, Vol. 351*. Retrieved from <https://www.astromatic.net/software/scamp>

Bizenberger, P., & Huber, A. (2013, May). *PANIC Bending Tests with the Mirror Structure*. Technical report, MPIA.

Bizenberger, P., Baumeister, H., Costa, J. B., & Peter, D. (2005). Optical design and cryogenic mounting of the optics for a pyramid waterfront sensor working in the near infrared wavelength range. *SPIE Proceedings Volume 5962, Optical Design and Engineering II*. Jena, Germany.

Bizenberger, P., Huber, A., & Bernhard, D. (2014, September). *PANIC Re-worked filters Acceptance & Verification Report*. Technical report, MPIA.

Blank, R., Anglin, S., Beletic, J. W., Bhargava, S., Bradley, R., Cabelli, C. A., . . . Zandía, M. (2012). H2RG focal plane array and camera performance update. *Proc. SPIE, Volume 8453, High Energy, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy V*. Amsterdam.

Brown, W. R., Epps, H. W., & Fabricant, D. G. (2004, Agosto). The Cryogenic Refractive Indices of S-FTM16, a Unique Optical Glass for Near-Infrared Instruments. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 833*.

Caratti, A., Stecklum, B., Lopez, R. G., J. Eisloffel, T. P., Sanna, A., Cesaroni, R., . . . Ibañez, J. M. (2017). Disk-mediated accretion burst in a high-mass young stellar object. *Nature Physics, 13*, 276-279.

- Cárdenas Vázquez, M. C. (2008, August). FDR Optical elements drawing set: Entrance window, L1 to L9, Pupil Imager Lens and Folding mirrors.
- Cárdenas Vázquez, M. C., & Rodríguez Gómez, J. F. (2007, July). *PANIC: Second Pixel Scale study*. Technical note, IAA.
- Cárdenas Vázquez, M. C., & Rodríguez Gómez, J. F. (2007, October). *Tolerance Analysis*. Technical note, IAA.
- Cárdenas Vázquez, M. C., Fernández, M., Fried, J. W., & Rodríguez Gómez, J. F. (September de 2008). *PANIC Optics FDR document*. Obtenido de PANIC's Optical Final Design Report, PANIC-OPT-SP-01, issue 0/1: http://panic.iaa.es/sites/default/files/documents/Optics_FDR.pdf
- Cárdenas Vázquez, M. C., Sánchez-Blanco, E., & Rodríguez Gómez, J. F. (2008, August). *Complete Image Quality Error Budget*. Technical note, IAA.
- Cárdenas Vázquez, M., Dorner, B., Huber, A., Sánchez-Blanco, E., Alter, M., & Rodríguez Gómez, J. F. (2018). PANIC: A General-purpose Panoramic Near-infrared Camera for the Calar Alto Observatory. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 130, 025003.
- CARMENES. (s.f.). Obtenido de <https://carmenes.caha.es/index.html>
- Costa, J. B., Feldt, M., Wagner, K., Bizenberger, P., Hippler, S., Baumeister, H., . . . Henning, T. (2004). Status report of PYRAMIR: a near-infrared pyramid wavefront sensor for ALFA. *SPIE Proceedings Volume 5490, Advancements in Adaptive Optics*. Glasgow, UK.
- Datos seeing Observatorio Calar Alto, 2001-2005*. (s.f.). Obtenido de <http://www.caha.es/CAHA/MISC/seeingold4.html>
- Devices, S. A. (2006). *TIE-37: Thermal expansion of ZERODUR*. Technical information, Schott AG.
- Dorner, B. (2015). *Opto-mechanical alignment sequence*. Technical report, MPIA.
- Dorner, B., & Cárdenas Vázquez, M. C. (2014, November). *PANIC Star Simulator test report 2: pre-transport*. Technical report.
- Dorner, B., & Cárdenas Vázquez, M. C. (2015, September). *PANIC Star Simulator test report*. Technical Report.
- Dorner, B., Huber, A., Cárdenas Vázquez, M. C., Ferro Rodriguez, I., Bizenberger, P., Naranjo, V., . . . Laun, W. (2014). PANIC in the lab: status before commissioning. *SPIE Proceedings Volume 9147, Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy V*. Montreal (Canadá).
- Feldman, A., Horowitz, D., Waxler, R. M., & Dodge, M. J. (1978). *Optical Materials Characterization Final Technical Report*. Technical Note, National Bureau of Standards, Washington D.C.
- Ferro Rodríguez, I. M. (2013, September). *Desarrollos Tecnológicos para la Caracterización de Materiales Ópticos a Bajas Temperaturas y Evaluación de Espejos de Aluminio para su Uso en Sistemas Ópticos*. Master Degree report, IAA, Granada.
- Fried, J. W., Fernandez, M., Rodríguez Gómez, J. F., Alter, M., Baumaister, H., & Cardenas, M. (2008, October). *PANIC PDR document*. (Páginas: 1-20, 23-27 and 44-86) Retrieved from PDR Document, PANIC-GEN-SP-01, issue 0/1: http://panic.iaa.es/sites/default/files/documents/PANIC_PDR.pdf
- Herbst, T. M., Beckwith, S. V., Birk, C., Hippler, S., McCaughrean, M. J., Mannucci, F., & Wolf, J. (1993). MAGIC: a new near-infrared camera for Calar Alto. *Proc. SPIE 1946, Infrared Detectors and Instrumentation*. Orlando, FL, United States. doi:10.1117/12.158714
- Hodapp, K. W., Lenzen, R., Pirard, J., & Sánchez, V. (2007). *Preliminary Design Review Report*.
- Huber, A., & Bizenberger, P. (2013, June). *PANIC Optical alignment and verification concept*. Technical report, MPIA.
- Huber, A., Baumeister, H., Rohloff, R.-R., & Fried, J. W. (November de 2009). *Mechanical Final Design Report*. Obtenido de PANIC's Mechanical Final Design Report, PANIC-MEC-SP-001, issue 1.0: <http://panic.iaa.es/sites/default/files/panicmechanicalfinaldesignreport-issue1.pdf>
- Ibáñez Mengual, J. M. (2017). *PANIC Pipeline Documentation*. Obtenido de <https://www.iaa.csic.es/~jmiguel/PANIC/PAPI/html/index.html>

- Kovacs, Z., Mall, U., Bizenberger, P., Baumeister, H., & Roser, H.-J. (2004). Characterization, testing, and operation of Omega2000 wide-field infrared camera. *SPIE Proceedings Volume 5499, Optical and Infrared Detectors for Astronomy*. Glasgow.
- Lang, D., Hogg, D. W., Mierle, K., Blanton, M., & Roweis, S. (2010, March). Astrometry.net: Blind astrometric calibration of arbitrary astronomical images. *Astronomical Journal*, 139(5).
- Lenzen, R., Bizenberger, P., Salm, N., & Storz, C. (1998). Omega Cass: a new multimode NIR-imager/spectrometer for the Calar Alto Observatory. *Proc. SPIE 3354, Infrared Astronomical Instrumentation*. Kona, HI, United States. doi:10.1117/12.317275
- Material Properties: 5083 Aluminium*. (n.d.). Retrieved from https://trc.nist.gov/cryogenics/materials/5083%20Aluminum/5083Aluminum_rev.htm
- METIS*. (s.f.). Obtenido de <https://www.mpia.de/en/PSF/instrumentation/metis>
- Naranjo, V. (2011). *Science Grade Mosaic Co-planarity*. Technical Report, MPIA.
- NEWFIRM-NOAO Extremely Wide Field Infrared Imager*. (s.f.). Obtenido de <https://www.noao.edu/ets/newfirm/>
- PANIC Panoramic Near-Infrared Camera*. (s.f.). Obtenido de <http://panic.iaa.es/>
- Sánchez S., F., Aceituno, J., Thiele, U., Pérez-Ramírez, D., & Alves, J. (2007). The Night Sky at the Calar Alto Observatory. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 119(860).
- Sánchez-Blanco, E., & Cárdenas Vázquez, M. C. (2007, June). *Glass catalogue*. Technical note, IAA.
- Sánchez-Blanco, E., & Cárdenas Vázquez, M. C. (2008, July). *Filters Specification*. Technical note, IAA.
- Sánchez-Blanco, E., & Cárdenas Vázquez, M. C. (2008, May). *Glass catalogue*. Technical note, IAA.
- Sánchez-Blanco, E., Cárdenas Vázquez, M. C., & Rodríguez Gómez, J. F. (2007, October). *Optical Assembly, Integration and Verification. Preliminary Design AIV*. Technical note, IAA.
- Sánchez-Blanco, E., Cárdenas Vázquez, M. C., & Rodríguez Gómez, J. F. (2008, February). *Ghost and Stray Light analysis*. Technical note, IAA.
- Sánchez-Blanco, E., Cárdenas Vázquez, M. C., & Rodríguez Gómez, J. F. (2008, September). *Optical Assembly, Integration and Verification*. Technical note, IAA.
- Sánchez-Blanco, E., Cárdenas Vázquez, M., & Fernández, M. (2007, March). *Signal to Noise cases*. Technical note, IAA.
- Shaw, A. W., Knigge, C., Meisenheimer, K., & Ibanez, J. M. (2015, July). NIR observations of V404 Cyg with PANIC. *The Astronomer's Telegram*, 7738.
- Shupe, D. L., Moshir, M., Li, J., Makovoz, D., Narron, R., & Hook, R. N. (2005). The SIP Convention for Representing Distortion in FITS Image Headers. *Astronomical Data Analysis Software and Systems XIV, ASP Conferences Series, Vol. XXX*.
- Stahle, C., Hill, B., Babu, S., Blake, P., Beletic, J., & Cleveland, K. (2011). *Detector Degradation Failure Review Board (DD-FRB)*. Report, James Webb Space Telescope (JWST).
- Telescopio 2.2 m*. (s.f.). Obtenido de <https://www.caha.es/CAHA/Telescopes/2.2m.html>
- Telescopio 3.5 m*. (s.f.). Obtenido de <https://www.caha.es/CAHA/Telescopes/3.5m.html>
- The Karlsruhe Optimized and Precise Radiative transfer Algorithm*. (s.f.). Obtenido de <https://www.imk-asf.kit.edu/english/312.php>
- The Two Micron All Sky Survey at IPAC*. (2003). Obtenido de <https://www.ipac.caltech.edu/2mass/>
- Verdes-Montenegro, L., Fernandez, M., Rodriguez, J., & Cardenas Vazquez, M. (2007, October). *PANIC Scientific requirements*. Requirement document, IAA.
- WFCAM - The UKIRT Wide Field Camera*. (s.f.). Obtenido de <http://www.roe.ac.uk/atc/projects/wfcam/>
- Wide-field InfraRed Camera*. (s.f.). Obtenido de WIRCam - Wide-field InfraRed Camera: <http://www.cfht.hawaii.edu/Instruments/Imaging/WIRCam/>
- Zandian, M., Farris, M., McLevige, W., Edwall, D., Arkun, E., Holland, E., . . . Beletic, J. W. (2016). Performance of science grade HgCdTe H4RG-15 image sensors. *Proc. SPIE, Volume 9915, High Energy, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy VII*. Edinburg.

LISTA DE ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS

2MASS	<i>Two Micron All-Sky Survey</i> (mapeado astronómico del cielo en la longitud de onda de 2 μm)
arcmin	Arcominuto, minuto de arco o minuto sexagesimal
arcsec	Arcosegundo, segundo de arco o segundo sexagesimal
adim	adimensional (sin unidades de medida)
AIE	Agrupación de Interés Económico
AIV	Montaje, Integración y Verificación (del inglés <i>Assembly, Integration and Verification</i>)
AOI	Ángulo de incidencia (del inglés <i>Angle of Incidence</i>)
BaF ₂	Fluoruro de Bario
CAHA	Centro Astronómico Hispano-Alemán
CaF ₂	Fluoruro de Calcio
CARMENES	Calar Alto <i>high-Resolution search for M dwarfs with Exoearths with Near-infrared and optical Échelle Spectrographs</i>
CMOS	Semiconductor complementario de óxido metálico (del inglés <i>Complementary Metal-Oxide-Semiconductor</i>)
CSIC	Conejo Superior de Investigaciones Científicas.
CTE	Coeficiente de dilatación lineal (del inglés <i>Coefficient of Thermal Expansion</i>)
CFHT	Canada-France-Hawaii <i>Telescope</i>
EE	Energía encerrada (del inglés <i>Encircled Energy</i>)
EP	Escala de Placa
E-SF03	Número de referencia de este vidrio óptico de la compañía " <i>HIKARI GLASS CO. Ltd.</i> "
FDR	Revisión de Diseño Final (del inglés <i>Final Design Review</i>)
FoV	Campo de visión (del inglés <i>Field Of View</i>)
FPA	Mosaico de detectores (del inglés <i>Focal Plane Array</i>)
FWHM	Anchura a mitad de altura (del inglés <i>Full Width at Half Maximum</i>)
HgCdTe	Telururo de mercurio-cadmio
IAA	Instituto de Astrofísica de Andalucía
Infrasil	Vidrio de cuarzo cualificado ópticamente para el infrarrojo cercano (conocido también en inglés como <i>Infrared Fused Silica</i>).
KOPRA	Karlsruhe <i>Optimized and Precise Radiative transfer Algorithm</i>
L0 a L9	Respectivamente, Lente primera a novena de PANIC.
LM	Montura de lente (del inglés <i>Lens Mount</i>)
NEWFRIM	NOAO <i>Extremely Wide Field Infrared Imager</i>
M1, M2, M3	Respectivamente primer, segundo y tercer espejo de doblado de PANIC
MAIV	Fabricación, Montaje, Integración y Verificación (del inglés <i>Manufacturing, Assembly, Integration and Verification</i>)
MAT	Telescopio de Micro-Alineado (del inglés <i>Micro-Alignment Telescope</i>)
METIS	<i>Mid-infrared ELT Imager and Spectrograph</i>
MoU	Documento de acuerdo (del inglés <i>Memorandum of Understanding</i>)
MPG	<i>Max-Planck-Gesellschaft</i>
MPIA	<i>Max-Planck-Institut für Astronomie</i>

MS	Estructura de los espejos (del inglés <i>Mirror Structure</i>)
NIR	Infrarrojo cercano (del inglés <i>Near InfraRed</i>)
NOAO	<i>National Optical Astronomy Observatory</i>
OD	Densidad Óptica (del inglés <i>Optical Density</i>)
OM	Montura Óptica (del inglés <i>Optics Mount</i>)
OTR	Trazado de rayos (del inglés <i>Optical Ray Tracing</i>)
PANIC	<i>Panoramic Near Infrared camera for Calar Alto</i>
PAPI	<i>PANIC Pipeline</i>
PDR	Revisión de Diseño Preliminar (del inglés <i>Preliminary Design Review</i>)
PIL	Lente reimagadora de pupila (del inglés <i>Pupil Imager Lens</i>)
PSF	Función de dispersión de punto (del inglés <i>Point Spread Function</i>)
px	píxel
RC	<i>Ritchey-Chrétien</i>
GRB	Explosiones de rayos gamma (del inglés <i>Gamma Ray Burst</i>)
rms	Media cuadrática o valor cuadrático medio (del inglés <i>root mean square</i>)
s. f.	sin fecha
SG	Grado científico (del inglés <i>Science Grade</i>)
SESO	<i>Société Européenne de Systèmes Optiques</i>
S-FTM16	Número de referencia de este vidrio óptico de la compañía "OHARA Inc."
S-FPL51	Número de referencia de este vidrio óptico de la compañía "OHARA Inc."
SS	Simulador de estrella (del inglés <i>Star Simulator</i>)
T22	Telescopio de CAHA de 2.2 m de apertura
T35	Telescopio de CAHA de 3.5 m de apertura
TA	Adaptador a Telescopio (del inglés <i>Telescope Adapter</i>)
WFE	Error del frente de onda (del inglés <i>Wavefront error</i>)
WFCAM	<i>Wide Field CAMera</i>
WIRCAM	<i>Wide-field InfraRed CAMera</i>
UKIRT	<i>United Kingdom Infra-Red Telescope</i>
ZnSe	Seleniuro de Zinc.

LISTA DE IMÁGENES

Imagen 1-1: Campos de visión y escalas de píxel de las diferentes cámaras infrarrojas de CAHA. A la izqda. en el T22 y a la dcha. en el T35.	8
Imagen 3-1: Esquema óptico de un telescopio reflector RC: M1 espejo primario, M2 espejo secundario, ambos hiperbólicos.....	16
Imagen 3-2: Arriba: Simulación mecánica de PANIC acoplada al T22. Debajo: PANIC acoplada al T22 durante su primer instalación.....	26
Imagen 3-3: Montura de las lentes propuesta para PANIC.	28
Imagen 3-4: Desplazamiento de la lente y el anillo de retención dentro de la montura debido a la bajada de temperatura.	29
Imagen 4-1: Esquema básico de los elementos ópticos principales necesarios.	35
Imagen 4-2: Sistema de referencia utilizado en el modelizado de los sistemas ópticos en <i>Zemax</i> . .	36
Imagen 4-3: Simulación óptica de PANIC acoplada al foco RC del T22.	43
Imagen 4-4: Esquema óptico de PANIC para la escala de placa de 0.45 arcsec/px.	44
Imagen 4-5: Esquema óptico de PANIC para la escala de placa de 0.25 arcsec/px.	44
Imagen 4-6: Diseño gráfico de la óptica PANIC, a la izqda. la escala de píxel de 0.45 arcsec/px, y a la derecha la de 0.25 arcsec/px.....	44
Imagen 4-7: Diseño opto-mecánico de PDR que muestra los principales subsistemas ópticos.	45
Imagen 4-8: Agrupamiento mecánico de PANIC para la escala de píxel de 0.45 arcsec/px.	46
Imagen 4-9: Agrupamiento mecánico de PANIC para la escala de píxel de 0.25 arcsec/px.	47
Imagen 4-10: Adaptador mecánico del T35 para interfaz opto-mecánica que permite a instrumentos del T22 operar en el T35.	54
Imagen 4-11: Esquema óptico del diseño final de PANIC.	55
Imagen 4-12: Diseño mecánico y criogénico final. Izqda.: vista superior del instrumento cerrado y en su posición de acople al telescopio. Dcha.: vista inferior del banco óptico del instrumento abierto.	60
Imagen 4-13: Agrupamiento mecánico del diseño óptico final de PANIC.	60
Imagen 4-14: Disposición opto-mecánica del diseño óptico final de PANIC que muestra los subsistemas principales.....	61
Imagen 5-1: Reproducción parcial del informe de resultados del procedimiento de validación para la fabricación de los chaflanes.	68
Imagen 5-2: Vidrio de CaF ₂ con dimensiones cercanas a L8, en su montura "tipo SESO" para las pruebas de supervivencia a ciclado criogénico. Izqda.: detalle lateral del contacto tipo bola en el chaflán y tipo muelle precargado en el perímetro. Dcha.: Posicionada en el criostato de pruebas dónde se pueden observar la localización de los sensores de temperatura.	70
Imagen 5-3: Réplica mecánica de L2 montada en la montura de lentes con chaflanes. A la izquierda: una muestra del recubrimiento para las lentes en BaF ₂	70
Imagen 5-4: Ejemplo de plano de fabricación de las lentes: L2.....	71
Imagen 5-5: Instalación de la ventana de entrada del criostato en PANIC para hacer su ciclado criogénico para la supervivencia de la misma.	73

Imagen 5-6: L8 en su montura "tipo SESO" preparada para su ciclado criogénico previa a la aceptación final de la lente.	74
Imagen 5-7: Izqda.: Detalle de los chaflanes de L8 fabricada. Dcha.: Detalle de la localización del sensor de temperatura en la montura "tipo SESO".....	74
Imagen 5-8: L3 y L6, de S-FTM16, en montura "tipo SESO" después de su ciclado en el criostato de pruebas.	74
Imagen 5-9: Ejemplo de plano de fabricación de los espejos: Espejo M3.	76
Imagen 5-10: Realizando el interferograma de superficie del espejo de prueba para la influencia de la montura en la calidad de su superficie.	77
Imagen 5-11: Espejo de prueba en el prototipo de montura e instalado en el criostato de pruebas para su ciclado criogénico.....	77
Imagen 5-12: Espejos de doblado sin recubrimiento a su recepción en noviembre de 2009.....	78
Imagen 5-13: Realizando el interferograma de superficie de M3 sin recubrir.	79
Imagen 5-14: Realizando el interferograma de superficie de M3 incluyendo la influencia de la montura en la medida.	79
Imagen 5-15: Interferograma de superficie de M2 sin recubrir, sin y con montura preliminar.	80
Imagen 5-16: Curva de reflectancia (línea roja) del recubrimiento de oro practicado en los tres espejos de doblado y en el espejo de prueba.	81
Imagen 5-17: Espejo M3 con el recubrimiento de oro aplicado y su montura real.	81
Imagen 5-18: Realizando el interferograma de superficie de M3 recubierto y en su montura preliminar.	82
Imagen 5-19: Filtro H a su recepción en el IAA.	84
Imagen 5-20: Izqda.: Muestra testigo del recubrimiento antirreflejante de la PIL. Dcha.: PIL a su recepción.	85
Imagen 5-21: PIL en montura "tipo SESO" dentro del criostato de pruebas justo después de su ciclado criogénico.	85
Imagen 5-22: Ventana de salida del criostato de PANIC durante la verificación de su calidad de superficie mediante un interferómetro.....	87
Imagen 5-23: Espejo auxiliar de aluminio para el alineado a temperatura ambiente de la MS.....	88
Imagen 5-24: Esbozo de la propuesta de dianas lineales para el alineado en caliente y verificación en frío del eje opto-mecánico de PANIC.....	89
Imagen 5-25: Planos de fabricación de dos de las dianas de alineamiento. Izqda.: T1 y dcha.: TB2.	89
Imagen 5-26: Plano de fabricación de la máscara de foco utilizada para el ajuste del detector de PANIC.....	90
Imagen 5-27: Izqda.: Modelo mecánico de la estructura de los espejos. Dcha.: Espejo M2 integrado en su montura después del remecanizado de su interfaz.	93
Imagen 5-28: Izqda.: Midiendo la orientación del eje opto-mecánico de entrada a la estructura de espejos. Dcha.: Midiendo dicho eje a la salida de la estructura de espejos.....	93
Imagen 5-29: Espejo auxiliar montado en el puerto de entrada de la estructura de espejos.	94
Imagen 5-30: Montaje experimental para la medida dinámica del eje opto-mecánico de la estructura de espejos.....	94
Imagen 5-31: Diseño mecánico de LM2.	95

Imagen 5-32: Izqda.: Localización en la montura de los cuatro pares de agujeros para centrar e inspeccionar el centrado de la lente en su montura. Dcha.: Detalle del diseño mecánico de cada punto de inspección.....	96
Imagen 5-33: Midiendo posición de la L4 con el micrómetro de profundidad.	96
Imagen 5-34: Izqda.: Tornillos con 7 arandelas cónicas. Dcha.: L2 integrada y centrada en su montura real.....	97
Imagen 5-35: Izqda.: Foto de la PIL donde se aprecian sus chaflanes en ambas caras de la lente. Dcha.: PIL integrada y centrada en su montura real.	97
Imagen 5-36: Vista desde el telescopio de las ruedas de filtros 1 y 2. Izqda.: en la rueda 1 los filtros Y (posición 1), H (2) y J (5), la PIL (3) y una posición ciega (4). Dcha.: rueda 2 con los filtros Z (1), K_S (2) y H₂ (4), una posición ciega (3).	98
Imagen 5-37: Unidad de ruedas de filtros preparada para su integración en el banco óptico de PANIC.....	99
Imagen 5-38: Integración del barril LM3. A la izqda.: anillo fabricado del compensador de distancia en el eje Z de este barril.	100
Imagen 5-39: Diseño mecánico del compensador de descentrado de L2.	101
Imagen 5-40: Tornillos de ajuste de descentrado de L6 en el barril LM3.	101
Imagen 5-41: Esquema del dispositivo experimental para la verificación interferencial del barril LM2.	102
Imagen 5-42: Esquema del dispositivo experimental para la verificación interferencial del barril LM3.	102
Imagen 5-43: Montaje experimental de la verificación interferencial de LM3 en doble paso.....	103
Imagen 5-44: Interferograma en doble paso de LM2. Izqda.: L2 desalineada. Dcha.: L2 centrada con un residuo menor que 50 μm	103
Imagen 5-45: Vista de PANIC montada en su carrito auxiliar de laboratorio: a) posición de operación, b) posición de AIV, c) rotando entre ambas posiciones, y d) a 90 °.....	104
Imagen 5-46: Vista de las dos dianas, T1 y T2, instaladas en el banco óptico de PANIC. La estructura de espejos y la rueda de diafragmas de apertura se encuentran también instaladas.	105
Imagen 5-47: De izqda. a dcha.: dianas principales, T1 y T2, y diana TB2 situada en el bafle entre la ventana de entrada y L1.	105
Imagen 5-48: Esquema mecánico de cuáles son las dianas usadas durante el alineado del instrumento y dónde se encuentran instaladas.....	105
Imagen 5-49: Vista del MAT desde la estructura de espejos. MAT montado en las cuatro etapas de ajuste.....	106
Imagen 5-50: Vista de las dos dianas, T1 y T2, instaladas en el bando óptico de PANIC y del espejo auxiliar instalado en el puerto de salida de la estructura de espejos.....	107
Imagen 5-51: a) y c) Midiendo el eje opto-mecánico en frío a través de la ventana auxiliar de salida con PANIC en posición de operación. b) visual de las dianas vistas a través de la ventana auxiliar de salida.	108
Imagen 5-52: Línea de visión del MAT de las dianas T1, T2 y TB2.....	111
Imagen 5-53: Izqda.: Línea de visión del MAT de las dianas T1, TLM2 y T2. Dcha.: Foto de las TLM2 y T2, y la luz de iluminación para TLM2.....	111

Imagen 5-54: Ejemplo de galgado: galgas introducidas en la interfaz entre la OM1 y el banco óptico de PANIC.....	112
Imagen 5-55: Izqda.: Imagen de la máscara de foco fabricada. Dcha.: Detalle de uno de los patrones de agujeros a distintas distancias de foco.....	114
Imagen 5-56: Máscara de foco instalada en la posición física del diafragma de campo, en la OM1.	114
Imagen 5-57: Anillo remecanizable que se instala en la interfaz del ajuste del detector.....	115
Imagen 5-58: Interfaz entre el puerto de salida de LM4 y la FPA. El anillo remecanizable se encuentra instalado.	115
Imagen 5-59: Banco óptico de PANIC con toda la óptica y los detectores instalados. La luz entra desde abajo, por la ventana de entrada.	115
Imagen 5-60: Izqda.: Imagen de la máscara de foco en el detector de PANIC. Dcha.: configuración de los cuadrantes de la máscara con respecto a los detectores.....	116
Imagen 5-61: Izqda.: Ajustes correspondiente al primer ciclado de ajuste del detector. Dcha: Idem correspondientes al cuarto y último ciclado realizado para este ajuste.....	117
Imagen 5-62: Izqda.: Interfaz para el SS instalado en el TA de PANIC. Dcha.: SS instalado en una de las posiciones de muestreo del campo de visión.....	118
Imagen 5-63: Izqda.: SS preparado para la toma de imágenes. Dcha. arriba: Detalle del ajuste en foco del SS. Dcha. abajo: Ajustando en foco la posición de la fibra objeto del SS.	119
Imagen 5-64: Ejemplo de la imagen obtenida en PANIC en laboratorio con el SS en dos posiciones del campo. Cada cuadrado iluminado es un pixel del detector.	120
Imagen 5-65: Izqda.: Detalle de los amortiguadores de la caja de transporte de la OM1. Dcha.: OM1 instalada en la caja de transporte.....	121
Imagen 5-66: Izqda.: Criostato de PANIC, sin óptica integrada, preparado para su transporte en su carrito auxiliar de laboratorio. Dcha.: Carrito auxiliar de transporte de PANIC al telescopio.....	121
Imagen 5-67: Muestra de algunos pasos durante el reensamblaje del instrumento en la sala limpia de CAHA. a) Integración de la estructura OM1. b) instalación de la ventana de entrada del criostato. c) Instalada la OM2. d) Instalando el escudo de radiación del criostato. e) Equipo satisfecho y contento.	123
Imagen 5-68: Izqda.: Comprobación del correcto funcionamiento de los detectores. Dcha.: Enfriado del instrumento en la sala limpia de aluminio del T35.....	124
Imagen 5-69: Izqda.: Transporte del instrumento frío entre los edificios del T35 y el T22. Dcha.: Realización de las pruebas de calidad óptica después de transporte en las instalaciones del T22.	124
Imagen 5-70: Montando por primera vez el instrumento en el T22. a) Presentando el instrumento debajo de la interfaz a foco <i>Cassegrain</i> . b) Prueba de interfaces. c) PANIC y su electrónica instalados en el telescopio. d) PANIC viajando solidaria con el telescopio durante la realización del equilibrado del telescopio.	125
Imagen 5-71: Imagen en directo de la luna llena del 6 de noviembre de 2014, correspondiente a la primera luz de PANIC.....	125
Imagen 5-72: Cilindros remecanizables de la interfaz de la cámara al telescopio. Izqda.: plano de fabricación. Dcha.: especificación del primer remecanizado del juego #1.	126

Imagen 5-73: Detalle de la localización de los acoples de posicionamiento ESTE y OESTE del instrumento. También se pueden ver los cilindros remecanizables instalados en sus correspondientes posiciones de la interfaz.	127
Imagen 5-74: Izqda.: Detalle de la interfaz del TA de PANIC, la orientación NORTE de la cámara se hace coincidir con la indicación N del foco del telescopio. Dcha.: Detalle del rotador del telescopio y la orientación de la cámara.	127
Imagen 5-75: Ejemplo de imagen usada para el ajuste de inclinación de PANIC, correspondiente al cúmulo abierto M67.	129
Imagen 5-76: Imagen del modo de ingeniería PIL+K _s para el alineado del diafragma frío con el espejo primario en el T22.	131
Imagen 5-77: PANIC montada en el foco RC del T35. Se observa la pieza de adaptación de la interfaz del T22 al T35.	132
Imagen 5-78: Ventana de entrada del criostato de P. Izqda.: midiendo el tamaño de la lasca. Dcha.: reparando el daño mediante fresado con muela de diamante.	132
Imagen 5-79: Imagen del modo de reimaginación de pupila en el T35.	134
Imagen 6-1: Curvas de transmisión de los filtros instalados en PANIC. Las curvas son para las condiciones de operación del filtro (100 K y haz convergente). Se incluye la curva teórica del cielo de CAHA.	139
Imagen 6-2: Calidad óptica de PANIC medida en laboratorio en comparación con el modelo óptico: izqda. antes del transporte y dcha. después de transporte.	140
Imagen 6-3: Puntos de medida establecidos en el PFA para la verificación de las prestaciones de la cámara.	145
Imagen A-1: Vista frontal del mosaico de detectores de PANIC.	174
Imagen A-2: Esquema del mosaico de detectores. Incluye estado del mapa de píxeles malos (en rojo) a fecha de noviembre de 2014 perteneciente a medidas realizadas con PANIC en laboratorio.	174
Imagen B-1: Telescopios de operación de PANIC, izqda.: T22 (Telescopio 2.2 m) y dcha.: T35 (Telescopio 3.5 m).	177
Imagen B-2: Localización de los campos analizados en el plano focal RC del T22.	179
Imagen B-3: Esquema del modelizado del T22 en <i>Zemax</i>	180
Imagen B-4: Diagrama de las aberraciones de <i>Seidel</i> presentes en el plano RC del T22.	180
Imagen B-5: Diagrama de puntos en plano focal RC del T22. Las tres longitudes de onda se encuentran superpuestas.	181
Imagen B-6: Mapa bidimensional del tamaño rms de la imagen en el RC del T22 en función de su posición en el campo de visión.	181
Imagen B-7: Localización de los campos analizados en el plano focal RC del T35.	183
Imagen B-8: Diagrama de puntos en plano focal RC del T35. Las tres longitudes de onda se encuentran superpuestas.	183
Imagen B-9: Mapa bidimensional del tamaño rms de la imagen en el RC del T35 en función de su posición en el campo de visión.	184
Imagen C-1: Muestreo del campo de visión visto en la superficie del detector.	187
Imagen C-2: Muestreo del campo de visión visto en la superficie del detector.	187
Imagen C-3: Imagen del espejo primario del T22 en el detector del instrumento usando el modo de reimaginación de pupila.	188

Imagen C-4: Imagen del espejo primario del T35 en el detector del instrumento usando el modo de reimaginación de pupila.	189
Imagen C-5: Calidad de imagen de PANIC en el T22, medida en el modelo policromático y para todo el campo de visión. Izqda.: Gráfica de la energía encerrada en función del tamaño de la imagen. Dcha.: Diagrama de puntos de la imagen.	192
Imagen C-6: Calidad de imagen de PANIC en el T35, medida en el modelo policromático y para todo el campo de visión. Izqda.: Gráfica de la energía encerrada en función del tamaño de la imagen. Dcha.: Diagrama de puntos de la imagen.	192
Imagen D-1: Esquema óptico del SS compuesto por dos dobletes acromáticos.	204
Imagen D-2: Esquema del sistema de iluminación del SS para producir el objeto.	205
Imagen D-3: Localización en el detector de PANIC de los puntos del FoV muestreados con el SS.	206
Imagen D-4: Vista superior del diseño mecánico de la interfaz para el simulador de estrella.	207
Imagen D-5: PSF de las imágenes obtenidas para el SG1, posición 2 con el filtro K_s	208
Imagen D-6: Ejemplo del ajuste parabólico de la serie de foco del SG1, posición 2.	208
Imagen D-7: Diagrama de puntos del modelo SS hasta el plano focal del telescopio para el filtro H_2 y para las cuatro posiciones en el FoV.	209

LISTA DE TABLAS

Tabla 1–1: Cámaras infrarrojas de gran campo actualmente en operación.	9
Tabla 3–1: Requerimientos básicos iniciales.	24
Tabla 3–2: Especificaciones básicas iniciales.	26
Tabla 3–3: Otros requerimientos iniciales.	27
Tabla 4–1: Parámetros básicos de diseño de la cámara, conteniendo las dos escalas de píxel para trabajar en el T22.	33
Tabla 4–2: Distancias objeto e imagen para la solución paraxial.	33
Tabla 4–3: Calidad óptica requerida para PANIC y su comparación con el límite de <i>Airy</i> y el <i>seeing</i> atmosférico de CAHA.	38
Tabla 4–4: Lista de especificaciones con impacto en el diseño óptico de la cámara.	41
Tabla 4–5: Tolerancias de fabricación para los elementos ópticos.	47
Tabla 4–6: Tolerancias preliminares de posicionado mecánico para los distintos elementos del sistema completo.	48
Tabla 4–7: Lista de especificaciones y su verificación para ambas escalas de píxel de PANIC.	50
Tabla 4–8: Tolerancias de fabricación para los elementos ópticos individuales.	61
Tabla 4–9: Tolerancias de posicionado mecánico para los distintos elementos del sistema completo.	62
Tabla 4–10: Lista de especificaciones y su verificación para ambas escalas de píxel de PANIC correspondientes al diseño óptico final.	63
Tabla 5–1: Contratos realizados para la fabricación de los distintos elementos ópticos de PANIC. ...	66
Tabla 5–2: Medidas de la calidad de superficie de los espejos, antes de ser recubiertos (sin y con montura) y de los espejos recubiertos en su montura.	78
Tabla 5–3: Transmitancia de los recubrimientos antirreflejantes ópticos construidos y su especificación para fabricación.	80
Tabla 5–4: Especificación detallada de fabricación de los filtros de ciencia de PANIC en sus condiciones de operación.	83
Tabla 5–5: Sistemas auxiliares del AIV de PANIC.	86
Tabla 5–6: Caracterización de las flexiones del banco óptico de PANIC.	109
Tabla 5–7: Localización de las dianas mecánicas usadas durante el alineado del instrumento y precisión de la medida en X/Y que se puede obtener con el MAT en nuestra configuración de laboratorio.	111
Tabla 5–8: Tamaño de la imagen en términos de FWHM esperado por el modelo óptico del SS+PANIC y su correspondiente medida experimental en laboratorio antes de transporte.	120
Tabla 6–1: Prestaciones del diseño óptico final de PANIC en sus condiciones de trabajo.	136
Tabla 6–2: Prestaciones del diseño óptico construido de PANIC en sus condiciones de trabajo.	137
Tabla 6–3: Disposición final de las ruedas de filtros de PANIC.	138
Tabla 6–4: Parámetros de los filtros de ciencia construidos de PANIC en sus condiciones de operación.	138
Tabla 6–5: Calidad óptica de PANIC en el laboratorio y comparación con el modelo óptico, medidas antes y después de su transporte, y después del accidente.	140

Tabla 6–6: Prestaciones de PANIC trabajando en el T22.	141
Tabla 6–7: Prestaciones esperadas de PANIC trabajando en el T35.	141
Tabla 6–8: Tamaño de la imagen de PANIC en las observaciones con el T22 y comparación con el esperado por el modelo óptico construido.	143
Tabla 6–9: Tamaño de la imagen de PANIC en las observaciones en el T35 y comparación con el esperado por modelo óptico construido.	143
Tabla 6–10: Magnitudes límite de las cámaras infrarrojas de gran campo actualmente en operación.	144
Tabla 7–1: Prestaciones del diseño óptico construido de PANIC en sus condiciones de trabajo.	153
Tabla A–1: Parámetros básicos de los detectores de PANIC con relación con el sistema óptico.	173
Tabla B–1: Parámetros de la configuración RC del T22 y del T35.	178
Tabla B–2: Parámetros de los espejos primarios del T22 y del T35.	178
Tabla B–3: Parámetros de los espejos secundarios del T22 y del T35.	178
Tabla B–4: Campos usados para el modelado del T22.	179
Tabla B–5: rms WFE en el plano focal RC del T22, para $\lambda = 1 \mu\text{m}$	181
Tabla B–6: Campos usados para el modelado del T35.	182
Tabla B–7: rms WFE en el plano focal RC del T35, para $\lambda = 1 \mu\text{m}$	182
Tabla C–1: Longitudes de onda usadas en el diseño óptico en ambos telescopios para el muestreo del rango espectral de trabajo de PANIC.	186
Tabla C–2: Campos usados para la optimización del diseño óptico de PANIC en el T22, con una escala de placa de 0.45 arcsec/px.	186
Tabla C–3: Campos usados para la optimización del diseño óptico de PANIC en el T35, con una escala de placa de 0.224 arcsec/px.	187
Tabla C–4: Campos usados para la optimización del diseño óptico de la PIL en el T22.	188
Tabla C–5: Campos usados para la optimización del diseño óptico de la PIL en el T35.	189
Tabla C–6: Valores de los componentes del sistema óptico en sus condiciones de trabajo, temperatura 80 K y vacío, correspondientes al diseño óptico final.	191
Tabla C–7: Prestaciones del diseño óptico final de PANIC en el T22 evaluadas para cada banda fotométrica.	193
Tabla C–8: Prestaciones del diseño óptico final de PANIC en el T35 evaluadas para cada banda fotométrica.	193
Tabla C–9: Coeficientes de expansión térmica calculados para el rango de temperatura entre 80 K y 293 K.	194
Tabla C–10: Parámetros de los componentes ópticos del diseño óptico final a temperatura ambiente.	195
Tabla C–11: Parámetros de los componentes ópticos del diseño óptico en fabricación a temperatura ambiente.	196
Tabla C–12: Parámetros de los componentes ópticos del diseño óptico construido a temperatura ambiente.	197
Tabla C–13: Transmitancia de los recubrimientos antirreflejantes ópticos construidos y su especificación para fabricación.	198
Tabla C–14: Coeficientes de expansión térmica calculados para el rango de temperatura entre 293 K y la temperatura de trabajo correspondiente indicada.	199

Tabla C-15: Valores de los componentes del sistema óptico construido en sus condiciones de trabajo, temperatura 95 K para la óptica y 100 K para los filtros y la PIL.....	201
Tabla C-16: Prestaciones del diseño óptico construido de PANIC en el T22 evaluadas para cada banda fotométrica.	201
Tabla C-17: Prestaciones del diseño óptico construido de PANIC en el T35 evaluadas para cada banda fotométrica.	201
Tabla D-1: Requerimientos básicos del SS.....	203
Tabla D-2: Localización del SS en su interfaz mecánica al TA y su correspondencia en el mosaico de detectores de PANIC.	206
Tabla D-3: Configuración del SS en función de la banda espectral y la localización dentro del FoV de las medidas.	207
Tabla D-4: Tamaño del radio rms esperado por el modelo óptico del SS+PANIC incluyendo el tamaño del núcleo de la fibra.....	210
Tabla D-5: Tamaño de la imagen en términos de FWHM esperado por modelo óptico del SS+PANIC incluyendo el tamaño del núcleo de la fibra.	210
Tabla F-1: Línea de trabajo del proyecto.	214

APÉNDICES

A. MOSAICO DE DETECTORES: HAWAII-2RG

El detector infrarrojo de PANIC es un mosaico formado por cuatro detectores HAWAII-2RG de grado científico (SG, del inglés *Science Grade*) integrados en una unidad denominada FPA en una disposición de 2×2 (Imagen A-1) y empaquetados tal que exista el mínimo hueco físico entre ellos.

Una vez pasado el PDR del instrumento, finales de 2007, se adquiere el FPA para PANIC. En ese momento el detector infrarrojo más avanzado que producía *Teledyne Imaging Sensors* era el “HAWAII-2RG” (Beletic, et al., 2008) y (Blank, et al., 2012), compuesto por una matriz de 2048×2048 píxeles con un tamaño de píxel de 18 μm . Este detector es tipo CMOS[‡] híbrido que usa un sustrato de HgCdTe (Teluro de mercurio-cadmio) como detector de fotones, el cual tiene un rango de sensibilidad espectral muy extenso, desde 0.3 a 5 μm , con una alta eficiencia cuántica y muy baja corriente de oscuridad.

El *cut-off* es elegible entre tres posibles: 1.7 μm , 2.5 μm ó 5 μm , según la proporción de Cd en el sustrato. Dado el rango espectral de PANIC, en nuestro caso se adquirieron los 4 detectores con su *cut-off* a 2.5 μm .

Las características de los detectores construidos relevantes para el diseño óptico se muestran en la siguiente Tabla A–1 y la disposición y dimensiones del mosaico en la Imagen A-2.

Parámetro		Especificación	SG-1	SG-2	SG-3	SG-4
Detector		Hawaii-2RG	-	-	-	-
Temperatura de operación	K	77-80	-	-	-	-
Número de píxeles	#	2048 x 2048	-	-	-	-
Tamaño de píxel	μm	18	-	-	-	-
Potencia disipada	mW	≤ 1.0	0.37	0.35	0.19	0.19
<i>Cut-off</i> a 77 K	μm	2.45-2.65	2.45	2.52	2.56	2.60
Eficiencia cuántica 0.6 – 1.0 μm	%	≥ 55	76	85	79	73
Eficiencia cuántica 1.0 – 2.4 μm	%	≥ 70	84	100	91	82
Planitud [§]	μm	≤ 30	8	7	5	7
Paralelismo **	μm	≤ 50	15	9	14	22
Planitud del mosaico	μm	≤ 100	± 20			
Hueco físico entre detectores	px	mínimo posible	≤ 167			
Dimensión total mosaico detectores	px	4096 + hueco	4263			
	mm	73.728 + hueco	76.734			

Tabla A–1: Parámetros básicos de los detectores de PANIC con relación con el sistema óptico.

A la entrega del detector se realizaron medidas de la planitud del mosaico, mostrada en la tabla anterior, y de su orientación con respecto a su montura mecánica, cuyos resultados

‡ CMOS es el acrónimo de “Semiconductor complementario de óxido metálico” (del inglés “Complementary Metal-Oxide-Semiconductor”)

§ Máxima variación (pico-valle) con respecto al mejor plano de ajuste.

** Paralelismo del mejor plano de ajuste con respecto a la placa de montaje.

se encuentran detallados en una nota técnica del proyecto (Naranjo, 2011). El mosaico presenta un ángulo con respecto a su montura menor a 3.5 arcmin. Este aspecto se tuvo en cuenta a la hora de la integración y ajustes finales del detector para situarlo en la mejor posición focal.

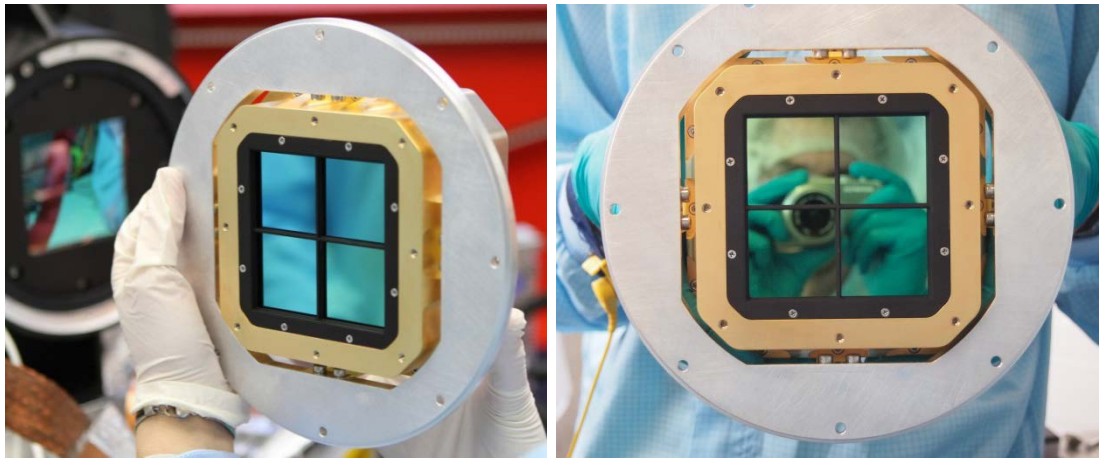


Imagen A-1: Vista frontal del mosaico de detectores de PANIC.

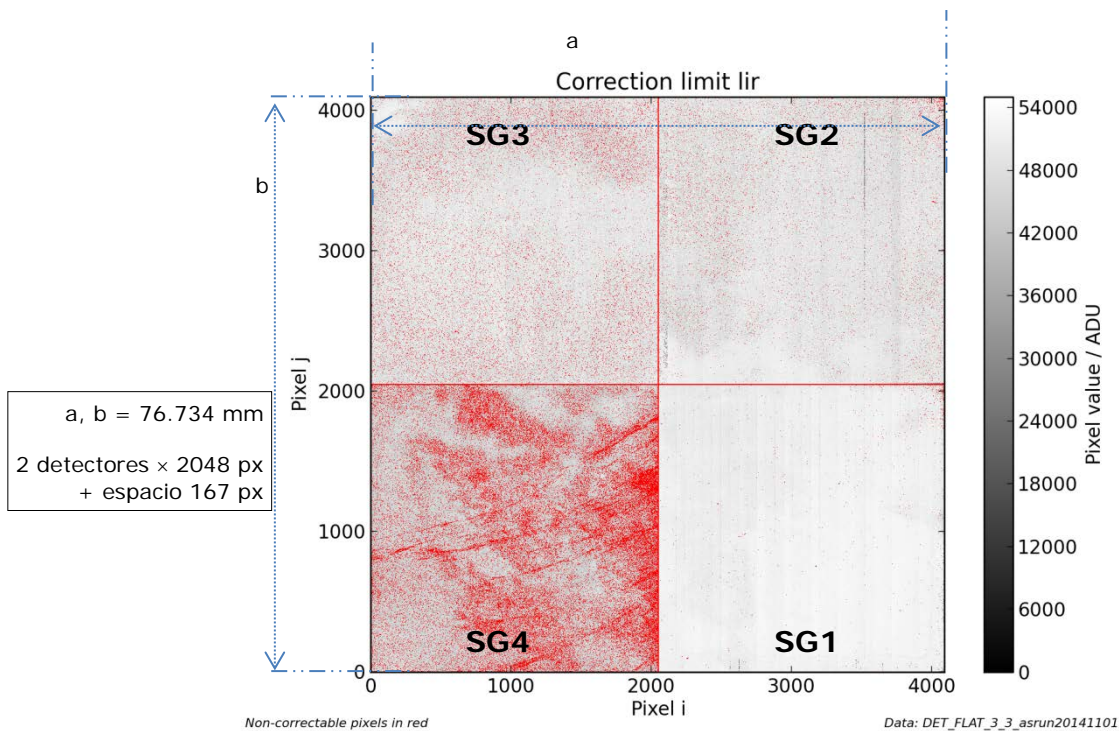


Imagen A-2: Esquema del mosaico de detectores. Incluye estado del mapa de píxeles malos (en rojo) a fecha de noviembre de 2014 perteneciente a medidas realizadas con PANIC en laboratorio.

Los resultados de la caracterización final de los detectores llevada a cabo en 2013 se pueden encontrar en (Cárdenas Vázquez, et al., 2018). Es importante destacar que lamentablemente estos detectores fabricados en 2007 sufren de una degradación que se detectó por primera vez en los detectores del *James Web Telescope* (Stahle, et al., 2011) en 2011.

El efecto que esta degradación se manifiesta en un importante incremento en la corriente de oscuridad de determinados píxeles, lo que conlleva a un aumento bastante dramático de los denominados píxeles calientes.

En estos cuatro detectores se han considerado que los píxeles calientes tienen una tasa de corriente de oscuridad mayor a 2500 e⁻/s, con lo que no se podrán usar para la detección de luz pues ya poseen de por sí mismos una señal mayor a la que han de detectar.

Los cuatro detectores de PANIC no están afectados en el mismo grado. Así el SG1 no muestra apenas degradación, mientras que el SG4 se ha convertido en completamente no útil para la obtención de datos científicos, estando los otros dos detectores también afectados pero en un rango intermedio.

En el mapa de píxeles malos (Imagen A-2) obtenido en pruebas realizadas en laboratorio en 2014, se puede apreciar el grado de afección de los distintos detectores. Los píxeles malos, señalados en rojo en la imagen, corresponden mayoritariamente a píxeles calientes.

El nuevo proyecto de renovación del mosaico actual de detectores por uno nuevo ha comenzado durante este año 2018, después de una ardua lucha para la obtención de los fondos necesarios para ello.

El nuevo detector será un HAWAII-4RG compuesto por una matriz de 4096×4096 píxeles con un tamaño de píxel de 15 μm, y de nuevo con *cut-off* a 2.5 μm. Este detector es una evolución del 2RG y pertenece a la nueva generación de detectores infrarrojos que *Teledyne* ha comenzado a ofrecer a mediados de 2016 con grado científico (Zandian, et al., 2016).

B. MODELOS ÓPTICOS DE LOS TELESCOPIOS: T22 Y T35

Los telescopios T22 y T35 tienen una configuración óptica *Ritchey-Chrétien* en una montura ecuatorial tipo horquilla el primero, y en una montura ecuatorial en herradura el segundo (Imagen B-1). Este tipo de configuración óptica consiste en un espejo primario y un espejo secundario ambos hiperbólicos y proporciona por diseño una cancelación de las aberraciones esférica y coma de tercer orden así como un gran campo de visión.

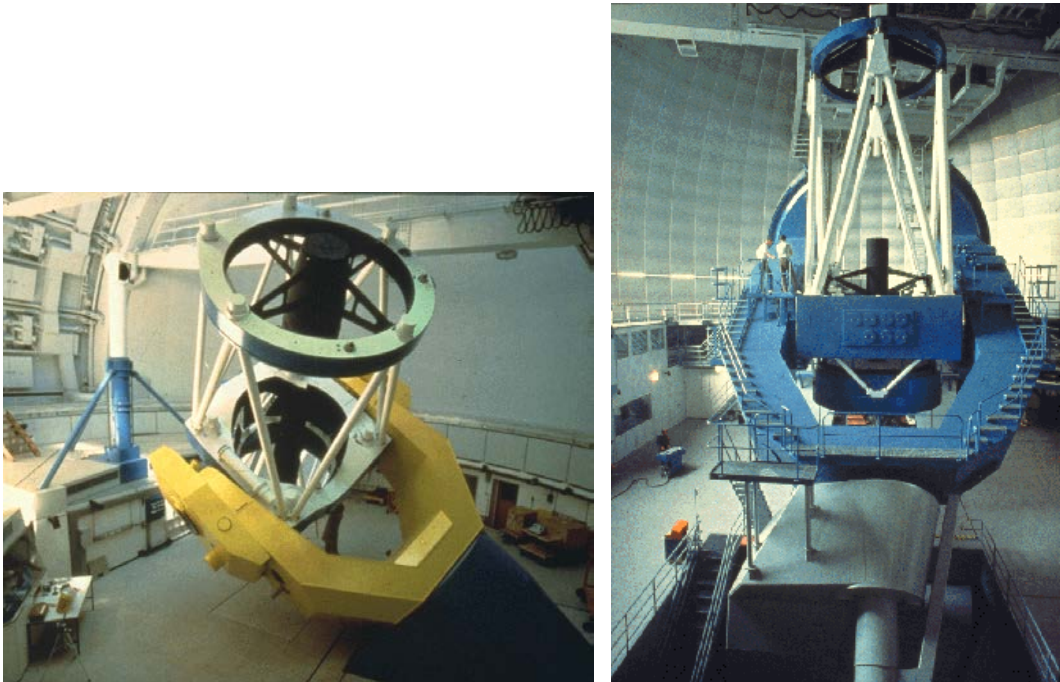


Imagen B-1: Telescopios de operación de PANIC, izqda.: T22 (Telescopio 2.2 m) y dcha.: T35 (Telescopio 3.5 m).

Los parámetros de los telescopios utilizados para su modelización en *Zemax* se detallan en la Tabla B-1, Tabla B-2 y Tabla B-3. Estos datos han sido extraídos de la documentación entregada al observatorio por el fabricante de los telescopios, la empresa *Carl Zeiss* (Alemania). Parte de esta información se encuentra pública en (Telescopio 2.2 m) y (Telescopio 3.5 m).

Las tolerancias de estos parámetros vienen dadas por la norma DIN 7168, grado medio, según figura en la documentación referida.

Ambos telescopios se han modelado para el campo de visión de interés de PANIC con el objeto de estudiar el comportamiento del mismo y cuantificar las aberraciones presentes.

Telescopio		T22	T35
Configuración óptica		Foco RC	Foco RC
Apertura	mm	2200	3500
Longitud focal	mm	17611	35000
Diámetro obturación central	mm	887	1367
Área colectora efectiva	m ²	3.183	8.153
Relación focal	adim	8.005	10.000
Distancia focal trasera	mm	1216.5	1850.07
Rango de enfoque	mm	240	60
FoV accesible sin viñeteo, lado	mm	170.0	300.0
	arcmin	33.18	29.47
Escala de placa	arcsec/mm	11.712	5.893
	μm/arcsec	85.38	169.69
Radio de la curvatura de campo	mm	-2228	-3786
Distancia M1-M2	mm	4469.20	8594.43
Distancia M2-focus	mm	5685.69	10444.50
Distancia interfaz estación <i>Cassegrain</i> al plano focal RC	mm	545	675
Grosor arañas espejo secundario	mm	14	25
Orientación arañas espejo secundario	grados	90	90
Rango ángulo horario	h: min	-16:40 a +16:40	-7 a +7

Tabla B-1: Parámetros de la configuración RC del T22 y del T35.

Espejo primario		T22	T35
Diámetro externo	mm	2300	3585
Apertura	mm	2200	3500
Diámetro agujero central	mm	580	650
Grosor en el borde	mm	325	590
Radio de curvatura	mm	$-1.32 \cdot 10^4$	$-2.45 \cdot 10^4$
Constante cónica	adim	-1.0	-1.0
Término esférico de cuarto orden	adim	$7.307 \cdot 10^{-15}$	$8.88 \cdot 10^{-16}$
Material		Zerodur®	Zerodur®
Recubrimiento reflector		Aluminio	Aluminio

Tabla B-2: Parámetros de los espejos primarios del T22 y del T35.

Espejo secundario		T22	T35
Diámetro externo	mm	886	1120
Grosor en el borde	mm	80	168
Radio de curvatura	mm	6816	11247.9
Constante cónica	adim	-1.0	-1.0
Término esférico de cuarto orden	adim	$-2.186 \cdot 10^{-12}$	$-4.03 \cdot 10^{-13}$
Término esférico de sexto orden	adim	$1.211 \cdot 10^{-19}$	$6.92 \cdot 10^{-21}$
Material		Zerodur®	Zerodur®
Recubrimiento reflector		Aluminio	Aluminio

Tabla B-3: Parámetros de los espejos secundarios del T22 y del T35.

B.1. T22

El máximo FoV de PANIC en el T22 es de (31.92×31.92) arcmin. Para la modelización del telescopio, dada la simetría de revolución en torno al eje Z del sistema óptico, es suficiente con muestrear la diagonal. El campo de visión es muy grande por lo que es necesario usar al menos cuatro puntos para su muestreo, uno localizado en el eje óptico, otro en el extremo, y los otros dos intermedios siguiendo un criterio de igualdad de área muestreada en el objeto (que no de igual distancia). En la en la Tabla B-4 se listan los campos usados en el T22, tanto en el espacio objeto como su resultado en el espacio imagen, es decir, en el plano focal del telescopio.

Campo	Objeto X, Y coordenadas en cielo (°)	Imagen X, Y coordenadas en RC telescopio (mm)
1	(0.0 ; 0.0)	(0.0 ; 0.0)
2	(0.154 ; 0.154)	(47.33 ; 47.33)
3	(0.218 ; 0.218)	(66.99 ; 66.99)
4	(0.266 ; 0.266)	(81.73 ; 81.73)

Tabla B-4: Campos usados para el modelado del T22.

Y en la siguiente Imagen B-2, ya resultado de la modelización en *Zemax* del telescopio, se visualiza la localización de dichos campos en el foco del telescopio.

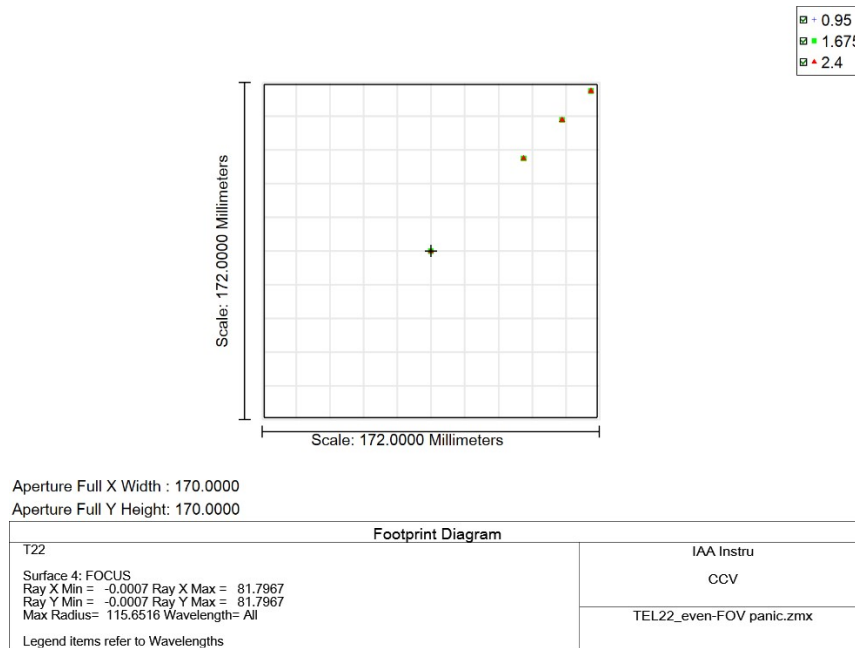
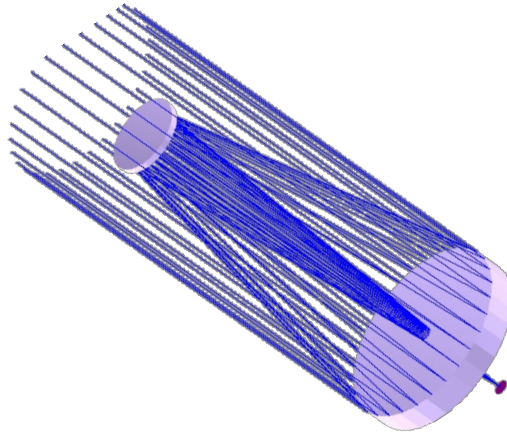


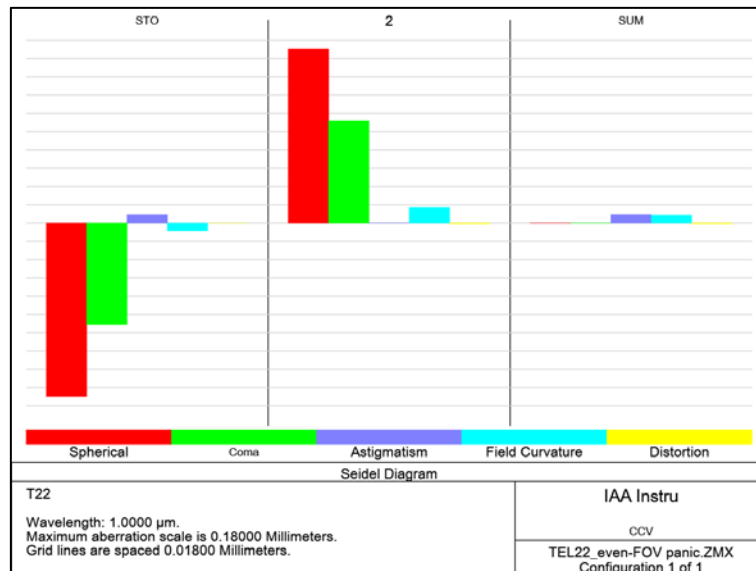
Imagen B-2: Localización de los campos analizados en el plano focal RC del T22.

La Imagen B-3 corresponde al esquema del modelizado del T22, donde la marcha de rayos dibujada corresponde al campo axial que proviene de objeto en el infinito, y forma imagen en el foco RC (enfanzado en púrpura) del telescopio. La pupila de entrada del sistema se establece en el espejo primario.

Imagen B-3: Esquema del modelizado del T22 en *Zemax*.

El plano focal del telescopio es una superficie curva que se encuentra localizada en una posición en la que la aberración del frente de onda sea mínima para todas las longitudes de onda en todo el campo. En este caso al ser un sistema puramente reflectivo el plano focal es acromático.

La configuración RC proporciona por diseño la cancelación de las aberraciones esférica y coma entre primario y secundario ya referida, pero no de astigmatismo ni de curvatura de campo. Así, en el plano focal se obtendrán imágenes circulares, pero se produce un aumento de su tamaño conforme nos alejamos del eje del sistema. Se puede corroborar en el modelo realizado. Para visualizarlo y cuantificarlo se muestran las siguientes imágenes. La Imagen B-4 corresponde a las aberraciones de primer orden presentes en el sistema por cada superficie ("STO" es el espejo primario y "2" el espejo secundario) y el resultado en el plano focal del sistema ("SUM").

Imagen B-4: Diagrama de las aberraciones de *Seidel* presentes en el plano RC del T22.

En la Imagen B-5 se muestran los diagramas de puntos de la imagen obtenida en el plano focal de cada campo muestreado. El círculo negro representa el tamaño del disco de *Airy* para la longitud de onda central (en este caso $1.675 \mu\text{m}$). Y en la Imagen B-6 el mapa dimensional del *rms spot radius*.

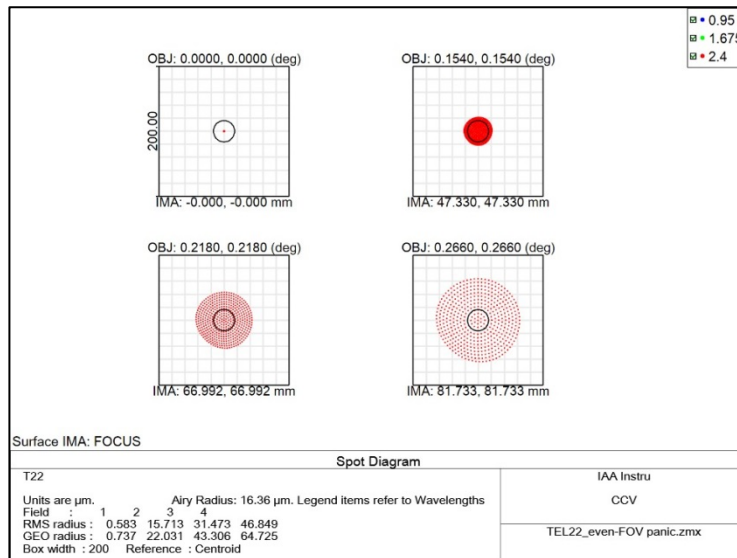


Imagen B-5: Diagrama de puntos en plano focal RC del T22. Las tres longitudes de onda se encuentran superpuestas.

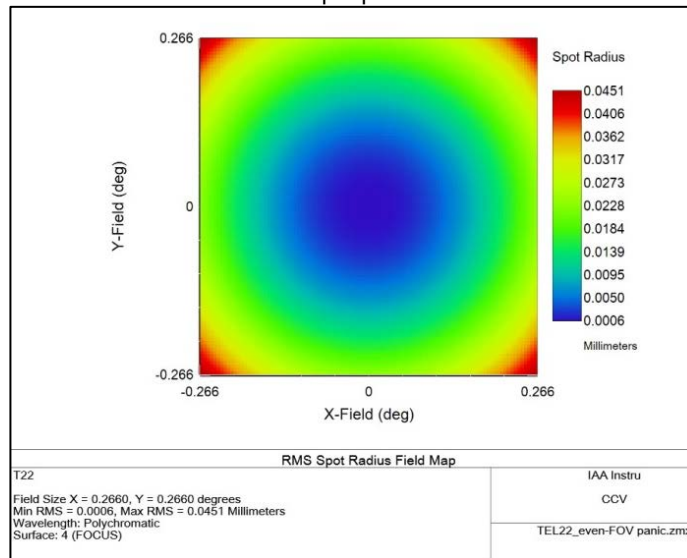


Imagen B-6: Mapa bidimensional del tamaño rms de la imagen en el RC del T22 en función de su posición en el campo de visión.

El modelo basado en las cifras nominales del telescopio nos revela un sistema altamente optimizado de prestaciones próximas al ideal en eje, pero no fuera de eje. El telescopio tan solo está limitado por difracción en campos cercanos al eje óptico y presenta un astigmatismo muy severo para campos de gran ángulo.

Para el campo de visión de PANIC el telescopio posee un rms WFE de hasta $0.8 \cdot \lambda$, donde se ha tomado $\lambda = 1 \mu\text{m}$ (ver Tabla B-5), muy por encima del límite de $0.07 \cdot \lambda$, de la ecuación [3.15]. La contribución principal a dicho error de frente de onda es debida a astigmatismo. El telescopio cumpliría el criterio de *Rayleigh* dentro de un campo de visión máximo de 0.22° (equivalente a un FoV circular de unos 13 arcmin).

Campo	Objeto / X, Y coordenadas en cielo ($^\circ$)	rms WFE (λ)
1	(0.0 ; 0.0)	0.005
2	(0.154 ; 0.154)	0.272
3	(0.218 ; 0.218)	0.547
4	(0.266 ; 0.266)	0.812

Tabla B-5: rms WFE en el plano focal RC del T22, para $\lambda = 1 \mu\text{m}$.

B.2. T35

El modelizado de este telescopio se ha realizado teniendo en cuenta la mismas consideraciones que en el T22, respecto al muestreo del campo de visión, establecimiento del espejo primario como pupila de entrada y el análisis de aberraciones.

Los siguientes campos (Tabla B-6) se han usado para cubrir el campo de visión de PANIC en este telescopio de (16.3×16.3) arcmin. En la Imagen B-7 se visualizan la localización de dichos campos en el plano focal del telescopio y en la Imagen B-8 los correspondientes diagramas de puntos, que se complementa con la Imagen B-9 del mapa bidimensional del *rms spot radius* en el plano focal.

El resultado es completamente similar al del T22. De nuevo en el T35 el plano focal del telescopio es una superficie curva que se encuentra localizada en una posición en la que la aberración del frente de onda sea mínima para todas las longitudes de onda en todo el campo. No hay aberración cromática, ni esférica, ni coma. Y se aprecia el aumento del tamaño de la imagen conforme nos alejamos del eje del sistema, debido al astigmatismo y la curvatura de campo.

El modelo basado en las cifras nominales del telescopio nos revela de nuevo un sistema altamente optimizado de prestaciones próximas al ideal en eje, pero no fuera de eje. Si bien este telescopio presenta aberraciones menores que el T22, otra vez encontramos que el telescopio tan solo está limitado por difracción en campos cercanos al eje óptico y que la contribución mayoritaria al error de frente de onda es debida a astigmatismo.

Para el campo de visión que de PANIC, el telescopio T35 posee un rms WFE de hasta $0.3 \cdot \lambda$, donde se ha tomado $\lambda = 1 \mu\text{m}$ (ver Tabla B-7), bastante mayor al límite de $0.07 \cdot \lambda$, de la ecuación [3.15]. El telescopio cumpliría el criterio de *Rayleigh* dentro de un campo de visión máximo de 0.19° (equivalente a un FoV circular de unos 11.4 arcmin).

Campo	Objeto	Imagen
	X, Y coordenadas en cielo ($^\circ$)	X, Y coordenadas en RC telescopio (mm)
1	(0.0 ; 0.0)	(0.0 ; 0.0)
2	(0.079 ; 0.079)	(48.26 ; 48.26)
3	(0.111 ; 0.111)	(67.80 ; 67.80)
4	(0.136 ; 0.136)	(83.07 ; 83.07)

Tabla B-6: Campos usados para el modelado del T35.

Campo	Objeto	rms WFE (λ)
	X, Y coordenadas en cielo ($^\circ$)	
1	(0.0 ; 0.0)	0.001
2	(0.079 ; 0.079)	0.101
3	(0.111 ; 0.111)	0.199
4	(0.136 ; 0.136)	0.299

Tabla B-7: rms WFE en el plano focal RC del T35, para $\lambda = 1 \mu\text{m}$.

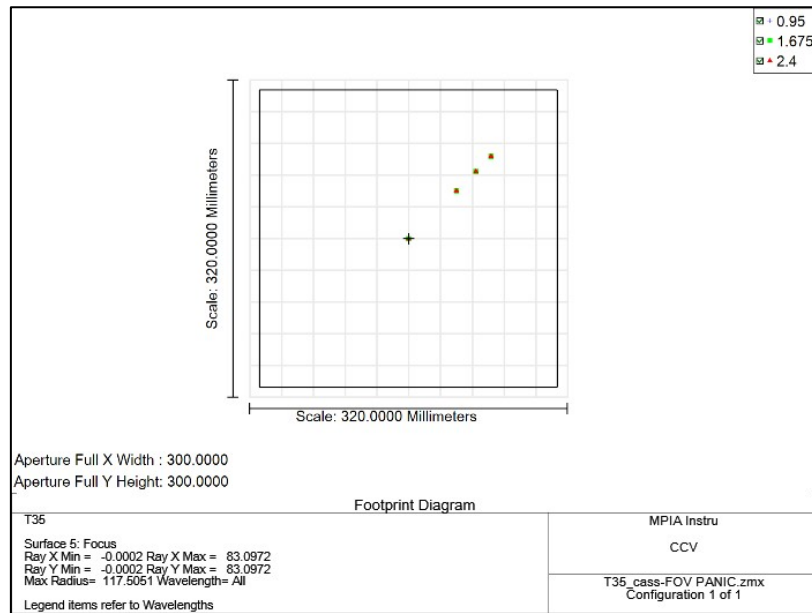


Imagen B-7: Localización de los campos analizados en el plano focal RC del T35.

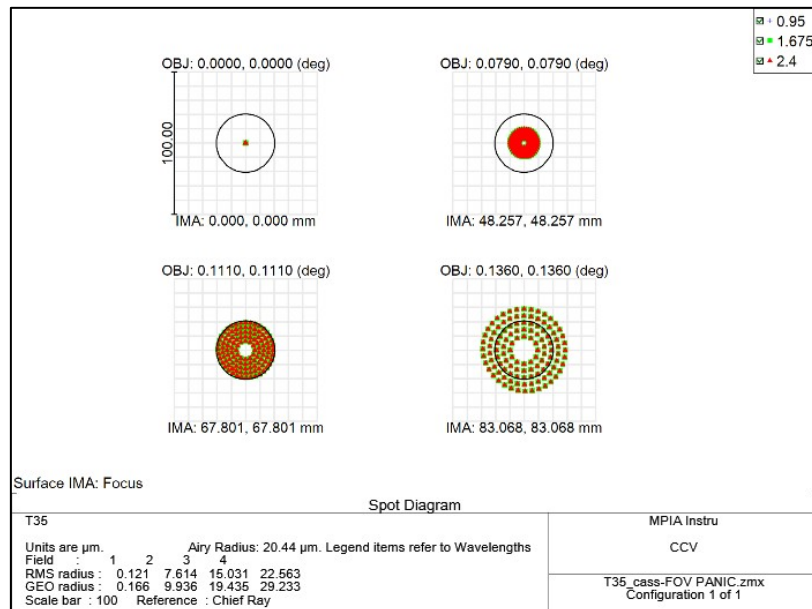


Imagen B-8: Diagrama de puntos en plano focal RC del T35. Las tres longitudes de onda se encuentran superpuestas.

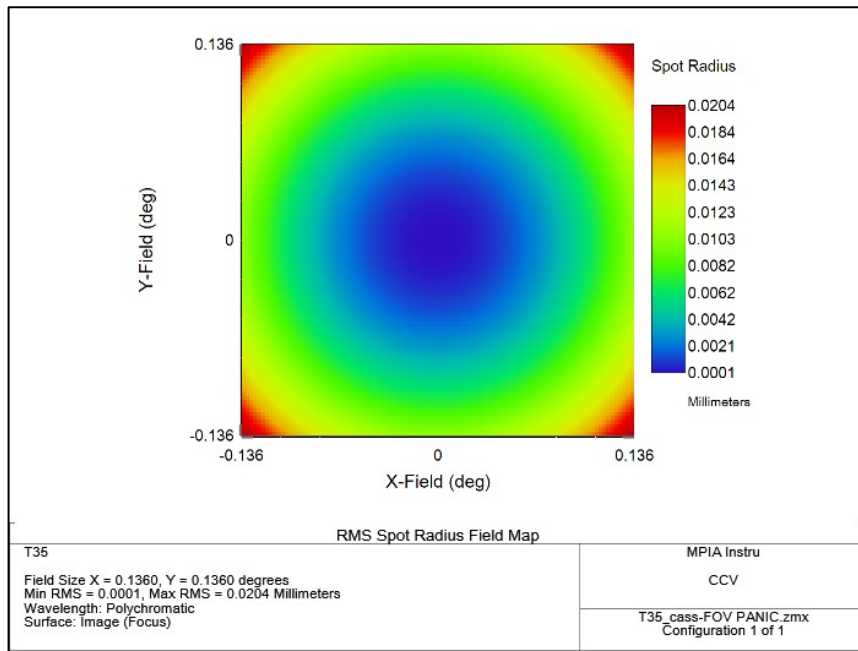


Imagen B-9: Mapa bidimensional del tamaño rms de la imagen en el RC del T35 en función de su posición en el campo de visión.

C. DISEÑOS ÓPTICOS DE PANIC

Se detallan a continuación los datos esenciales de la modelización de los modelos ópticos de la cámara PANIC.

Se modelan dos tipos de sistemas ópticos: el diseño del modo científico de la cámara, para objeto situado en el infinito e imagen en el detector, y el diseño del modo de reimaginación de la pupila con objeto situado en el espejo primario del telescopio e imagen en el detector.

De ambos modos de operación, se presenta el diseño óptico de FDR, el de fabricación y el construido. También se exponen las prestaciones obtenidas para los diseños de FDR y el construido.

El modelo de PDR, cuya función era demostrar que el sistema es realizable y garantizar su adecuado funcionamiento, estableció la línea base del instrumento como ya se ha explicado en el capítulo 4. Los modelos de PDR y de FDR son similares. Si bien el segundo está más evolucionado con el objetivo de llevarlo a fabricación y además contiene el modo de reimaginación de pupila que no existía en PDR. Por tanto, dada la similitud del detalle del modelo de PDR con el de FDR, no se ha considerado explicar aquí el de PDR en más detalle que el ya explicado en su correspondiente sección 4.2. Además todos los detalles de dicho diseño se pueden hallar en el documento de PDR (Fried, et al., 2008) disponible en la página web de PANIC (PANIC Panoramic Near-Infrared Camera), como ya se ha mencionado.

C.1. CONSIDERACIONES Y PARÁMETROS COMUNES

La cámara ha sido diseñada para el T22 y en el modelo en *Zemax* se incluye siempre dicho telescopio también. Las prestaciones de la cámara se han de alcanzar para sus condiciones de trabajo, así el modelo se ha realizado y optimizado a la temperatura de criogenia y condiciones de vacío. Es importante recordar que en el modelo de FDR la temperatura de trabajo es de 80 K y que en el modelo construido finalmente es de 95 K para las lentes y 100 K para los elementos ópticos localizados en las ruedas de filtros.

Para evaluar las prestaciones de la cámara en el T35, se ha realizado otro modelo óptico en *Zemax* conteniendo el T35 y la cámara.

La optimización del sistema óptico se ha llevado a cabo en todo el rango espectral de trabajo, según muestra la Tabla C-1. El intervalo requerido con calidad óptica, 0.95 a 2.4 μm , se ha muestreado en cuatro longitudes de onda equiespaciadas en ese rango. La longitud de onda primaria se establece a 1.43 μm .

Luego se añadió con menor peso la mínima longitud de onda de trabajo (0.82 μm) para cubrir hasta la banda **Z**, en la que tan solo se requería que la cámara transmitiese.

Longitud de onda	Valor (μm)	Peso asignado para optimización
1	0.82	0.8
2	0.95	1.0
3	1.43	1.0
4	1.91	1.0
6	2.40	1.0

Tabla C–1: Longitudes de onda usadas en el diseño óptico en ambos telescopios para el muestreo del rango espectral de trabajo de PANIC.

C.1.1. MODO CIENTÍFICO

Para la optimización del sistema óptico en *Zemax* se considera que el objeto se encuentra situado en el infinito y la imagen en el plano del detector del instrumento. La pupila de entrada del sistema óptico completo, telescopio + PANIC, se encuentra localizada en dicho espejo primario con apertura igual al espejo primario.

El campo de visión de **PANIC en el T22** se ha muestreado desde el centro hasta el campo extremo de forma radial y siguiendo el criterio de igual área para cubrir la superficie completa del mosaico de detectores, incluyendo el hueco entre ellos de 167 píxeles (equivalente a un máximo de 3 mm reportado por el fabricante del mosaico). El origen de coordenadas se establece en el centro del detector.

Dada la magnitud del campo de visión se hace necesario al menos muestrearlo radialmente en cuatro puntos, que de nuevo se hace siguiendo un criterio de igualdad de área muestreada en el objeto (que no de igual distancia). En la Tabla C–2 se listan los campos usados durante la optimización así como el peso asignado para conseguir minimizar y balancear las aberraciones a lo largo del gran campo de visión, que son muy severas para grandes ángulos con respecto al eje óptico. En la Imagen C-1 se visualiza la localización de dichos campos en el detector. El cuadrado representa la dimensión física completa del mosaico de detectores.

Campo	Objeto X, Y coordenadas en cielo ($^{\circ}$)	Imagen X, Y coordenadas en el detector (mm)	Peso asignado para optimización
1	(0.0 ; 0.0)	(0.0 ; 0.0)	1.7
2	(0.154 ; 0.154)	(22.26 ; 22.26)	1.2
3	(0.218 ; 0.218)	(31.65 ; 31.65)	1.5
4	(0.266 ; 0.266)	(38.78 ; 38.78)	4.5

Tabla C–2: Campos usados para la optimización del diseño óptico de PANIC en el T22, con una escala de placa de 0.45 arcsec/px.

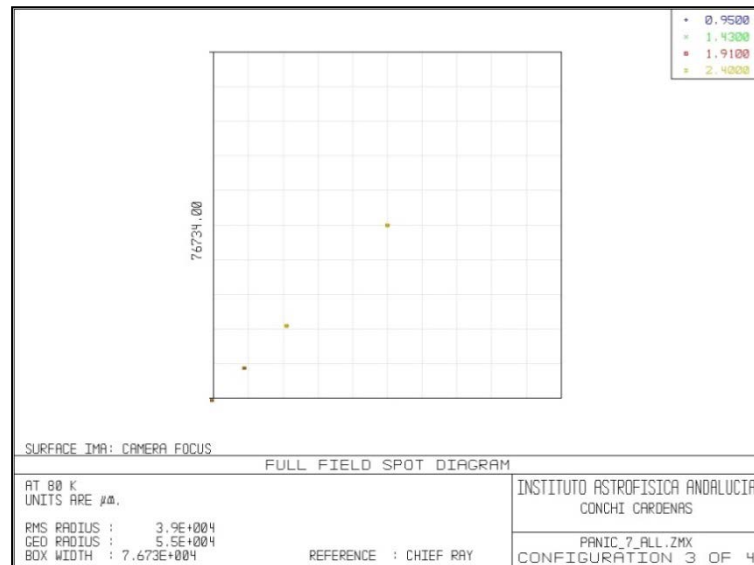


Imagen C-1: Muestreo del campo de visión visto en la superficie del detector.

Para la evaluación del modelo óptico en el campo de visión de **PANIC en el T35**, de nuevo se ha muestreado desde el centro hasta el campo extremo de forma radial y siguiendo el criterio de igual área para cubrir la superficie completa del mosaico de detectores, incluyendo un hueco entre ellos de 167 píxeles.

En la Tabla C-3 se listan los campos usados para la evaluación del diseño y en la Imagen C-2 se visualiza su correspondiente localización en el detector. En este caso se puede muestrear el campo de visión radialmente en tres puntos, que de nuevo se hace siguiendo un criterio de igualdad de área muestreada en el objeto.

Campo	Objeto	Imagen
	X, Y coordenadas en cielo (°)	X, Y coordenadas en RC telescopio (mm)
1	(0 ; 0)	(0.0 ; 0.0)
2	(0.095 ; 0.095)	(27.35 ; 27.35)
3	(0.135 ; 0.135)	(39.12 ; 39.12)

Tabla C-3: Campos usados para la optimización del diseño óptico de PANIC en el T35, con una escala de placa de 0.224 arcsec/px.

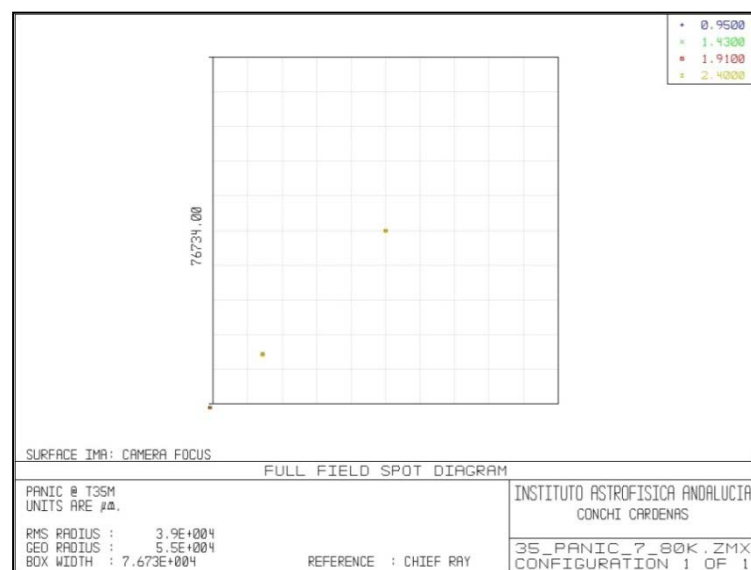


Imagen C-2: Muestreo del campo de visión visto en la superficie del detector.

C.1.2. MODO DE REIMAGINACIÓN DE PUPILA

En este modo del modelo óptico el objeto del sistema óptico es el espejo primario del telescopio y su imagen se encuentra en el detector. Recordemos que por requerimiento este modo ha de ser optimizado para la banda **K**.

La solución óptica adoptada hace uso de toda la óptica de PANIC y tan solo necesita introducir la PIL en el camino óptico entre L8 y L9. Además la PIL es diseñada de tal forma que la misma lente es válida para trabajar en ambos telescopios.

La configuración de las ruedas de filtros para este modo de operación es: rueda número 1 con la PIL, rueda número 2 con el filtro **K_s** y el resto de ruedas en posición "abierto".

De este modo, para la optimización del sistema óptico en *Zemax* se considera que el objeto es el espejo primario del telescopio, y éste se muestrea con un punto en el centro y cuatro puntos extremos de su perímetro, según se lista en la Tabla C-4 para el T22 y la Tabla C-5 para el T35.

En la Imagen C-3 e Imagen C-4 se visualiza la localización de dichos campos en el detector en ambos telescopios, respectivamente. El cuadrado representa la dimensión física completa del mosaico de detectores de PANIC.

Campo	Objeto X, Y coordenadas en el espejo primario del T22 (mm)	Imagen X, Y coordenadas en el detector (mm)
1	(0 ; 0)	(0.0 ; 0.0)
2	(0 ; 1100)	(0.0 ; 36.7)
3	(0 ; - 1100)	(0.0 ; -36.7)
4	(1100 ; 0)	(36.7 ; 0.0)
5	(-1100 ; 0)	(-36.7 ; 0.0)

Tabla C-4: Campos usados para la optimización del diseño óptico de la PIL en el T22.

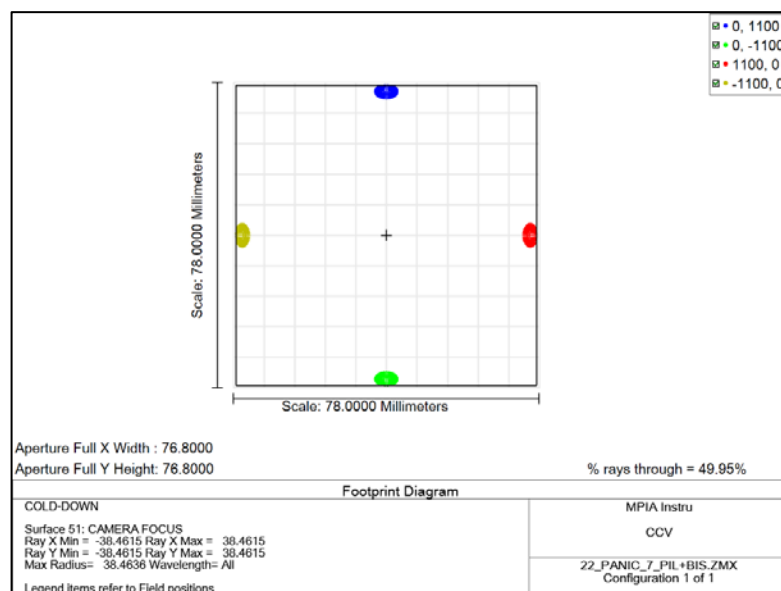


Imagen C-3: Imagen del espejo primario del T22 en el detector del instrumento usando el modo de reimaginación de pupila.

Campo	Objeto X, Y coordenadas en el espejo primario del T35 (mm)	Imagen X, Y coordenadas en el detector (mm)
1	(0 ; 0)	(0.0 ; 0.0)
2	(0 ; 1750)	(0.0 ; 28.5)
3	(0 ; - 1750)	(0.0 ; -28.5)
4	(1750 ; 0)	(28.5 ; 0.0)
5	(-1750 ; 0)	(-28.5 ; 0.0)

Tabla C-5: Campos usados para la optimización del diseño óptico de la PIL en el T35.

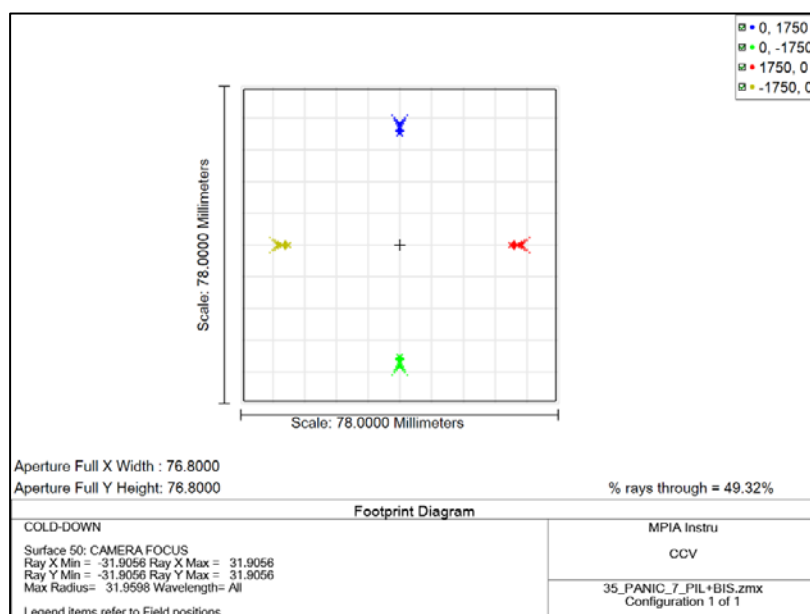


Imagen C-4: Imagen del espejo primario del T35 en el detector del instrumento usando el modo de reimaginación de pupila.

C.1.3. RESULTADOS DE PRESTACIONES Y CÁLCULO DE ERRORES

En los resultados presentados en las tablas de prestaciones del diseño óptico final (Tabla 6-1) y del diseño construido (Tabla 6-2) incluyen, pues, tanto las prestaciones del sistema óptico en su modo científico de trabajo (imagen de cielo) como las prestaciones de la reimaginación de la pupila.

Las prestaciones del sistema (modo científico) evaluadas son: la calidad de imagen (en términos del D_{EE80}), la longitud focal efectiva, la relación focal $F\#$, la escala de placa, el campo de visión y la distorsión geométrica.

Para el modo de reimaginación de pupila las prestaciones evaluadas son: el diámetro de la imagen de pupila en el detector, la calidad imagen pupila (en términos del tamaño rms de la imagen) y la resolución de la imagen de pupila (en términos del cociente entre la calidad de imagen y su tamaño, expresado en %).

El cálculo de errores se ha realizado usando *Zemax* mediante la evaluación de las tolerancias del sistema bajo cada prestación requerida.

Así, en el caso del diseño óptico final las tolerancias introducidas son las calculadas en el presupuesto de errores presentado en FDR, es decir, las tolerancias de fabricación (Tabla 4-8) y las tolerancias de posicionamiento (Tabla 4-9).

Y en el caso del diseño óptico construido las tolerancias introducidas corresponden a los errores, en frío, de los parámetros de los componentes ópticos construidos (Tabla C-12) y los errores de posicionado, determinados en laboratorio durante el alineado del instrumento, también trasladados a frío.

Una vez establecido el conjunto de tolerancias del sistema, se puede evaluar el cambio en las prestaciones requeridas del sistema mediante un análisis de Monte Carlo, el cual simula el efecto simultáneo del conjunto de tolerancias y es un buen estimador del comportamiento del sistema que cumple ese conjunto de tolerancias.

Mediante el análisis de Monte Carlo, se asigna a cada parámetro con tolerancia un valor aleatorio, dentro del rango definido por la tolerancia, y de comportamiento estadístico, del tipo "distribución normal". El error absoluto de los valores obtenidos por este método estadístico numérico es proporcional $\frac{1}{\sqrt{N}}$, siendo **N** el número de simulaciones Monte Carlo

realizadas para el análisis. Para minimizar el error, en este caso siempre se han realizado 200 simulaciones, que nos proporciona valores certeros hasta la centésima.

De este modo, para cada parámetro evaluado, el resultado del análisis proporciona el valor medio de las simulaciones y su desviación estándar. Es éste valor de la desviación estándar la que se toma como error y se muestra en las tablas de prestaciones.

C.2. MODELO ÓPTICO FDR

Se presenta a continuación el modelo óptico de PANIC defendido en la revisión de FDR. En este estado del proyecto la temperatura de trabajo del sistema era de 80 K.

En la Tabla C-6 se listan los valores de los distintos componentes en sus condiciones de trabajo de criogenia correspondientes al diseño óptico de FDR. En esta etapa del proyecto los radios de curvatura han sido redondeados hasta la milésima de mm y los espesores/separación entre componentes hasta la centésima de mm, así como las aperturas.

Los materiales ópticos usados han sido seleccionados de forma que existan datos de su índice de refracción hasta la temperatura de 80 K. Como ya hemos mencionado, se ha creado un catálogo de vidrios específico para esta temperatura. Se incluye, asimismo el espacio entre componentes y los parámetros de la PIL. La Imagen 4-11 (ya expuesta en la sección de FDR, 4.3) muestra este diseño óptico modelado en *Zemax*.

Componente	Radio de curvatura (mm)	Espesor o Separación (mm)	Material	Apertura Ø (mm)
Interfaz telescopios T22 / T35	Infinito	89.64 / 219.63	Aire	296.84 / 305.52
Ventana del criostato	Infinito Infinito	20.00	Infrasil	330.00
Espacio entre componentes		374.72	Vacio	-
L1	443.727 Infinito	25.20	Infrasil_80K	255.00
Espacio entre componentes		35.44	Vacio	-
Diafragma de campo	--	--	Aluminio_80K	157.4 × 157.4

Componente	Radio de curvatura (mm)	Espesor o Separación (mm)	Material	Apertura \varnothing (mm)
Espacio entre componentes		157.11	Vacio	-
M1	Infinito	28.40	Silice fundido_80K	284.00
Espacio entre componentes		255.00	Vacio	-
M2	Infinito	26.00	Silice fundido_80K	260.30
Espacio entre componentes		275.00	Vacio	-
M3	Infinito	23.50	Silice fundido_80K	234.80
Espacio entre componentes		125.00	Vacio	-
L2	436.174 -256.647	31.91	CaF ₂ _80K	178.87
Espacio entre componentes		33.42	Vacio	-
L3	-176.964 -436.765	10.00	S-FTM16_80K	158.94
Espacio entre componentes		17.43	Vacio	-
L4	-146.739 -140.799	13.00	Infrasil_80K	160.00
Espacio entre componentes		1.01	Vacio	-
L5	290.075 Infinito	16.75	Infrasil_80K	152.92
Espacio entre componentes		59.74	Vacio	-
Diafragma de apertura T35	--	--	Aluminio_80K	79.04
Espacio entre componentes		33.95	Vacio	-
Diafragma de apertura T22	--	--	Aluminio_80K	93.94
Espacio entre componentes		72.15	Vacio	-
L6	419.552 137.827	10.00	S-FTM16_80K	152.95
Espacio entre componentes		25.90	Vacio	-
L7	157.962 -1319.326	25.52	BaF ₂ _80K	142.95
Espacio entre componentes		16.32	Vacio	-
L8	290.988 Infinito	16.40	Infrasil_80K	150.00
Espacio entre componentes		79.56	Vacio	-
PIL	99.863 262.477	21.37	ZnSe_80K	122.00
Espacio entre componentes		40.72		-
Filtro	Infinito Infinito	8.30	Infrasil_80K	125.00
Espacio entre componentes		40.11	Vacio	-
L9	-116.309 251.758	30.80	Infrasil_80K	130.00
Espacio entre componentes		18.54	Vacio	-
Detector (2048·2+167)	Infinito	--	--	76.73 × 76.73

Tabla C-6: Valores de los componentes del sistema óptico en sus condiciones de trabajo, temperatura 80 K y vacío, correspondientes al diseño óptico final.

La calidad de imagen del instrumento es evaluada en términos del diámetro del círculo que encierra el 80% de la energía de la imagen, D_{EE80} . Esta magnitud se puede medir en *Zemax* usando la herramienta que representa la energía encerrada en la imagen en función del tamaño de la misma. En la Imagen C-5 se muestra a la izquierda dicha gráfica para el diseño de PANIC trabajando en el T22. El eje Y representa la fracción de energía encerrada, donde la línea negra horizontal indica el 80% de dicha energía. El eje X representa la distancia radial desde el centro de la imagen. La energía encerrada en función del tamaño de la imagen policromática para cada campo de visión analizado se muestra en las líneas en colores y el límite de difracción en negro.

Para visualizar estas gráficas se presentan asimismo los diagramas de puntos de la imagen para cada campo analizado (dcha. en Imagen C-5), que muestran la estructura geométrica de la imagen. En dicha imagen se presentan los cuatro campos analizados y para las longitudes de onda consideradas en la optimización. El cuadrado alrededor de cada campo indica la dimensión de **2 píxeles** ($36 \mu\text{m}$) en el plano focal y el círculo negro corresponde al tamaño del disco de *Airy*.

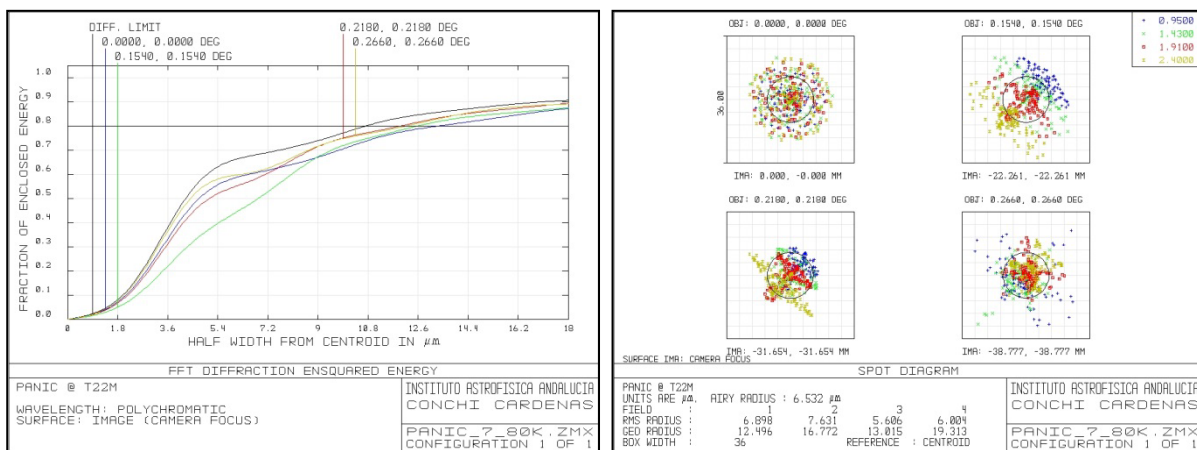


Imagen C-5: Calidad de imagen de PANIC en el T22, medida en el modelo policromático y para todo el campo de visión. Izqda.: Gráfica de la energía encerrada en función del tamaño de la imagen. Dcha.: Diagrama de puntos de la imagen.

Análogamente, la Imagen C-6 muestra las mismas magnitudes para PANIC trabajando en el T35. Tan solo notar que, en este caso, en el diagrama de puntos, el cuadrado indica la dimensión de **3 píxeles** ($54 \mu\text{m}$).

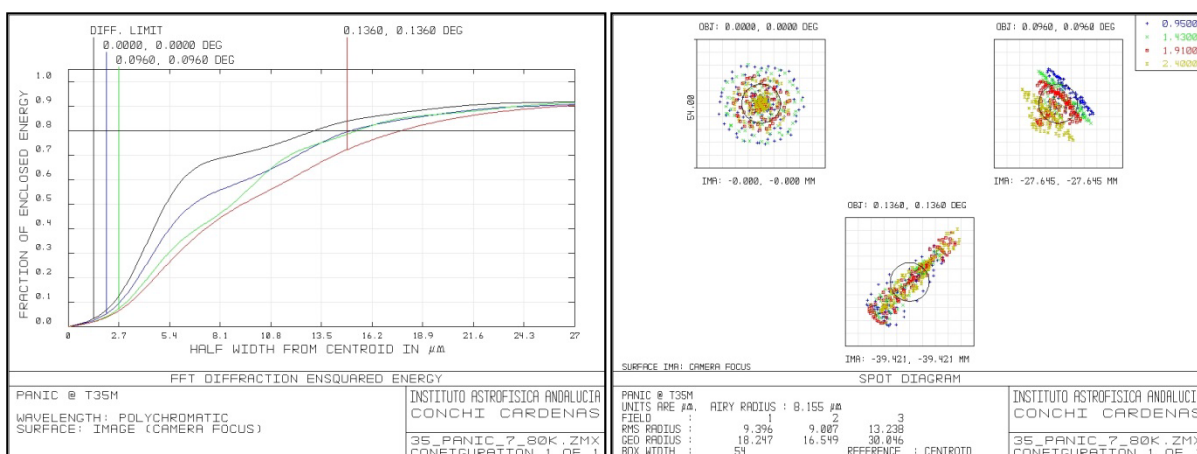


Imagen C-6: Calidad de imagen de PANIC en el T35, medida en el modelo policromático y para todo el campo de visión. Izqda.: Gráfica de la energía encerrada en función del tamaño de la imagen. Dcha.: Diagrama de puntos de la imagen.

Por simplicidad se han mostrado tan solo los diagramas policromáticos. Dado que el sistema permite reenfoque entre las distintas bandas fotométricas mediante el movimiento del espejo secundario del telescopio, se pueden obtener asimismo las prestaciones de PANIC para cada banda. A continuación se resumen estos datos para ambos telescopios en la Tabla C-7 y la Tabla C-8.

Rango espectral		Longitud focal (mm)	F#	Escala de placa (arcsec/px)	D_{EE80}	Distorsión (%)
Banda	(μm)					
Policromático	0.82-2.42	8255	3.745	0.445	26.40 μm = 1.47 px	1.34
Z	0.82-0.99	8244	3.743	0.445	20.22 μm = 1.12 px	1.38
Y	0.99-1.08	8247	3.744	0.444	16.34 μm = 0.91 px	1.37
J	1.08-1.34	8248	3.744	0.444	17.86 μm = 0.99 px	1.37
H	1.50-1.80	8252	3.745	0.445	24.26 μm = 1.35 px	1.35
K	1.97-2.42	8258	3.746	0.445	32.66 μm = 1.81 px	1.32

Tabla C-7: Prestaciones del diseño óptico final de PANIC en el T22 evaluadas para cada banda fotométrica.

Rango espectral		Longitud focal (mm)	F#	Escala de placa (arcsec/px)	D_{EE80}	Distorsión (%)
Banda	(μm)					
Policromático	0.82-2.42	16388	4.677	0.224	35.54 μm = 1.97 px	1.37
Z	0.82-0.99	16370	4.673	0.224	30.90 μm = 1.72 px	1.42
Y	0.99-1.08	16373	4.674	0.224	30.98 μm = 1.72 px	1.41
J	1.08-1.34	16376	4.674	0.224	32.34 μm = 1.80 px	1.41
H	1.50-1.80	16382	4.675	0.224	34.88 μm = 1.94 px	1.39
K	1.97-2.42	16393	4.677	0.224	39.32 μm = 2.18 px	1.35

Tabla C-8: Prestaciones del diseño óptico final de PANIC en el T35 evaluadas para cada banda fotométrica.

Para la fabricación de los distintos componentes y ensamblaje del instrumento en laboratorio es necesario calcular los parámetros de las lentes y las distancias entre componentes a la temperatura ambiente, en este caso 20 °C. Para ello se tiene en cuenta, no solo los coeficientes de expansión de los materiales ópticos (entre 80 K y 293 K), sino también el del material de separación entre ellas, en este caso Aluminio (Al 5083-T6).

Los valores del CTE_{int} han sido calculados como la integral del coeficiente lineal de expansión térmica entre la temperatura inicial, 293 K y la final, 80 K (ecuación [3.11]). Por tanto la longitud de los todos los elementos a la temperatura ambiente se puede calcular:

$$L_{293} = L_{80} (1 + \text{CTE}_{\text{int}}) \quad [\text{C.1}]$$

O bien, equivalentemente, mediante CTE_{eq} (ecuaciones [3.12] y [3.13]):

$$L_{293} = L_{80} (1 + \text{CTE}_{\text{eq}} \cdot \Delta T) \quad [\text{C.2}]$$

La siguiente Tabla C–9 muestra los valores calculados para los CTE_{int} y los CTE_{eq} usados entre 80 K y 293 K.

Material	CTE_{int} ($\Delta L/L$ %)	Fuente	CTE_{eq} ($10^{-6} K^{-1}$)
Al 5083-T6/AlMg4.5Mn	0.3860	(Material Properties: 5083 Aluminium)	18.13
BaF ₂	0.3146	(Feldman, Horowitz, Waxler, & Dodge, 1978)	14.77
CaF ₂	0.2963	(Feldman, Horowitz, Waxler, & Dodge, 1978)	13.91
Infrasil	0.0007	(Devices, 2006)	0.035
S-FTM16	0.1613	(Brown, Epps, & Fabricant, 2004)	7.57
ZnSe	0.1173	(Feldman, Horowitz, Waxler, & Dodge, 1978)	5.51

Tabla C–9: Coeficientes de expansión térmica calculados para el rango de temperatura entre 80 K y 293 K.

La Tabla C–10 corresponde a los valores (en mm) de los componentes ópticos de este diseño óptico final a temperatura ambiente. La apertura óptica está sobredimensionada con un margen del 5%. Estos datos son utilizados para la especificación detallada de los componentes para su fabricación.

Los doce radios de curvatura enfatizados en azul ha sido posible adaptarlos a los radios de curvatura maestros de la compañía SESO que fabrica estas lentes. Otros tres se han conseguido hacer superficies planas (en verde) y tan solo tres radios de curvatura (enfatizados en naranja) se han de fabricar a cliente.

La especificación detallada de fabricación de los recubrimientos antirreflejantes de los componentes ópticos del camino principal y reflejante para los espejos de doblado, requería de un recubrimiento que cubriese el rango de transmisión de la cámara, 0.8 a 2.5 μm , y optimizado entre 0.95 y 2.5 μm . Esta especificación a su vez se divide en dos: la transmitancia media en todo el rango espectral y la transmitancia mínima en dicho rango espectral. Con el establecimiento de una transmitancia mínima nos aseguramos de que, aunque la media cumpla, ésta no esté calculada en base a valores extremos tal que existiesen valores malos de transmitancia (muy por debajo de la transmitancia mínima). Así, la especificación para los recubrimientos antirreflejantes para la **ventana de entrada y las lentes** es que la transmisión media por superficie sea mayor al 98.5% y en todo caso superior al 98% en el rango espectral de optimización. Y para el recubrimiento reflejante para los **espejos de doblado**, la transmisión media requerida en el rango espectral de optimización sea mayor al 97% y la mínima superior al 95%.

La estimación de la transmitancia del sistema, presentada en la Tabla 6–1, se ha calculado con *Zemax* añadiendo a todas y cada una de las superficies de las lentes, y también de la ventana de entrada, un recubrimiento antirreflejante de transmitancia ideal y constante de un valor igual al 98.5% en todo el rango espectral del diseño óptico. De igual modo, a las superficies de los espejos de doblado se les ha añadido un recubrimiento reflectivo con una reflectividad constante del 97% en todo el rango espectral. Ni los efectos de los filtros de ciencia ni de los espejos del telescopio se han tenido en cuenta en esta estimación.

Elemento	Radio de curvatura		Espesor central	Espesor en el borde	Material	Apertura óptica	Diámetro físico
	Superficie frontal	Superficie trasera					
Ventana del criostato	Plana	Infinito	20.0 ± 0.1	20.00	Infrasil	288 ± 1	330.0 ± 0.5
L1	443.73 ± 0.44	Infinito	25.2 ± 0.1	2.94	Infrasil	248 ± 1	255.0 ± 0.1
Diafragma de campo	--	--	--	--	--	160 x 160 ± 0.2	
M1	Infinito	--	29.0 ± 0.5	--	Sílice Fundido	276 ± 1	284.0 ± 0.5
M2	Infinito	--	26.0 ± 0.5	--	Sílice Fundido	254 ± 1	262.0 ± 0.5
M3	Infinito	--	24.0 ± 0.5	--	Sílice Fundido	227 ± 1	235.0 ± 0.5
L2	437.47 ± 0.44	-257.41 ± 0.25	32.0 ± 0.1	3.18	CaF ₂	172 ± 1	179.4 ± 0.1
L3	-177.25 ± 0.2	-437.47 ± 0.44	10.0 ± 0.1	11.20	S-FTM16	151 ± 1	159.2 ± 0.1
L4	-146.74 ± 0.15	-140.79 ± 0.14	13.0 ± 0.1	3.59	Infrasil	152 ± 1	160.0 ± 0.1
L5	290.99 ± 0.3	Infinito	16.8 ± 0.1	3.14	BaF ₂	145 ± 1	153.4 ± 0.1
Diafragma de apertura T35	--	--	--	--	--	79.35 ± 0.15	
Diafragma de apertura T22	--	--	--	--	--	94.30 ± 0.15	
L6	420.23 ± 0.42	138.05 ± 0.14	10.0 ± 0.1	18.83	S-FTM16	114 ± 1	153.2 ± 0.1
L7	158.46 ± 0.16	-1323.49 ± 1.3	25.6 ± 0.1	3.45	BaF ₂	130 ± 1	143.4 ± 0.1
L8	290.99 ± 0.1	Infinito	16.4 ± 0.1	3.18	Infrasil	130 ± 1	150.0 ± 0.1
PIL	99.98 ± 0.1	262.79 ± 0.3	21.40 ± 0.1	2.98	ZnSe	114 ± 1	122.0 ± 0.1
Filtro	Infinito	Infinito	8.30	8.30	Infrasil	> 113.3	122.0 ± 0.1
L9	-116.31 ± 0.12	251.76 ± 0.25	30.8 ± 0.1	50.71	Infrasil	109 ± 1	130.0 ± 0.1

Tabla C–10: Parámetros de los componentes ópticos del diseño óptico final a temperatura ambiente.

En la Tabla 6–1 del capítulo 6 de resultados se ha mostrado el resumen de las prestaciones obtenidas del diseño óptico final de PANIC trabajando en ambos telescopios.

C.3. MODELO ÓPTICO EN FABRICACIÓN

Tras la revisión de FDR, la doctoranda realiza las iteraciones finales con los distintos fabricantes de los componentes ópticos así como con el equipo de mecánicos de PANIC, hasta llegar a la especificación detallada de dichos componentes ópticos. En la siguiente Tabla C–11 se listan los valores de fabricación del diseño óptico.

En la iteración con mecánicos, con el objetivo de disminuir el peso del instrumento, los espejos de doblado se cambian de circulares a rectangulares. Por otro lado, en la iteración con el fabricante de los mismos se cambia el material a *Zerodur* y se engrosan al valor requerido por el fabricante para las dimensiones mecánicas finales.

Respecto a las lentes, algunas de ellas han de ser engrosadas, y otras se ha aumentado/disminuido su diámetro, con el objetivo de que el espesor en el borde sea

adecuado para la fabricación de los chaflanes de forma segura, recordemos que ahora es necesario 8.5 mm de espesor mínimo en el borde.

Además, este cambio en el sistema óptico hace necesario el rediseño de la lente de pupila, con lo que sus radios de curvatura de fabricación son completamente distintos a los de FDR.

El nuevo sistema optimizado a su temperatura de trabajo de 80 K y cumpliendo las especificaciones del mismo modo que el diseño de FDR, es calentado mediante cálculo numérico para producir los valores de fabricación. De igual modo que con el modelo de FDR (explicado en sección C.2), para obtener la longitud de los distintos elementos a la temperatura ambiente de nuevo se hace uso de la ecuación [C.1] o de la [C.2], considerando los valores de la Tabla C-9.

Las modificaciones necesarias hechas con respecto a la Tabla C-10 se han enfatizado en **violeta** en la siguiente Tabla C-11.

Componente	Radio de curvatura (mm)		Espesor (mm)		Material	Apertura Óptica (mm)	Diámetro Físico (mm)
	Superficie frontal	Superficie trasera	Central	Borde			
Ventana del criostato	Infinito	Infinito	20.0 ± 0.1	20.0 ± 0.1	Infrasil	288 ± 1	330.0 ± 0.5
L1	443.73 ± 0.44	Infinito	27.4 ± 0.1	3.32 ± 0.05	Infrasil	249 ± 1	255.0 ± 0.1
Diafragma de campo	--	--	--	--	--	158.8 x 158.8 +0.5.-0.2	
M1	Infinito	--	30 ± 0.5	--	Zerodur	164 x 228 ± 1	174 x 238 ± 0.05
M2	Infinito	--	30 ± 0.5	--	Zerodur	160 x 226 ± 1	170 x 236 ± 0.05
M3	Infinito	--	35 ± 0.5	--	Zerodur	160 x 224 ± 1	170 x 236 ± 0.05
L2	437.47 ± 0.44	-257.41 ± 0.25	34.0 ± 0.1	3.88 ± 0.05	CaF ₂	173 ± 1	179.5 ± 0.1
L3	-177.25 ± 0.2	-437.47 ± 0.44	10.0 ± 0.1	14.18 ± 0.05	S-FTM16	152 ± 1	162.5 ± 0.1
L4	-146.74 ± 0.15	-140.79 ± 0.14	13.0 ± 0.1	4.32 ± 0.05	Infrasil	154 ± 1	167.0 ± 0.1
L5	290.99 ± 0.3	Infinito	18.8 ± 0.1	3.06 ± 0.05	BaF ₂	147 ± 1	153.5 ± 0.1
Diafragma de apertura T35	--	--	--	--	--	81.80 ± 0.15	
Diafragma de apertura T22	--	--	--	--	--	96.38 ± 0.15	
L6	420.23 ± 0.42	138.05 ± 0.14	10.0 ± 0.1	14.92 ± 0.05	S-FTM16	115 ± 1	140.0 ± 0.1
L7	158.46 ± 0.16	-1323.5 ± 1.3	27.7 ± 0.1	3.86 ± 0.05	BaF ₂	131 ± 1	143.5 ± 0.1
L8	290.99 ± 0.3	Infinito	18.3 ± 0.1	3.01 ± 0.05	Infrasil	132 ± 1	150.0 ± 0.1
PIL	119.71 ± 0.1	548.7 ± 0.1	22.0 ± 0.1	3.76 ± 0.05	ZnSe	114 ± 1	122.0 ± 0.1
Filtro	Plana	Plana	< 8.5	< 8.5	Infrasil	113.5 ⁺¹ -0.2	122.0 ⁺⁰ -0.1
L9	-116.31 ± 0.12	251.76 ± 0.25	30.8 ± 0.1	48.96 ± 0.05	Infrasil	110 ± 1	130.0 ± 0.1

Tabla C-11: Parámetros de los componentes ópticos del diseño óptico en fabricación a temperatura ambiente.

C.4. MODELO ÓPTICO CONSTRUIDO

Conforme se fueron fabricando los componentes ópticos, se evaluaron los respectivos informes de verificación recibidos de los proveedores. Si el informe no presenta ninguna anomalía los parámetros ópticos construidos se introducen en el modelo óptico. En el caso de haber alguna “no conformidad”, ésta se evalúa en el sistema óptico y se acepta cuando es absorbible, re-optimizando el diseño óptico, usando como variables los espacios entre lentes. Esto requiere una estrecha colaboración con el ingeniero mecánico para la iteración de la posible implementación del cambio y la aprobación por parte del equipo de PANIC.

Los valores a temperatura ambiente de los componentes ópticos construidos se listan en la siguiente Tabla C–12. Los errores corresponden al error de la medida del correspondiente parámetro realizada por el fabricante. Las “no conformidades” con mayor impacto en el diseño se enfatizan en rojo en la tabla. En verde se han enfatizado aquellas que fueron fácilmente absorbibles.

Componente	Radio de curvatura (mm)		Espesor (mm)		Material	Apertura Óptica (mm)	Diámetro Físico (mm)
	Superficie frontal	Superficie trasera	Central	Borde			
Ventana del criostato	Infinito	Infinito	20.06 ± 0.01	20.06 ± 0.01	Infrasil	288.0 ± 0.8	329.5 ± 0.1
L1	443.75 ± 0.03	Infinito	27.02 ± 0.02	3.02 ± 0.02	Infrasil	249 ± 1	255.10 ± 0.01
Diafragma de campo	--	--	--	--	--	158.8 x 158.8 ± 0.2	
M1	Infinito	--	30.14 ± 0.01	--	Zerodur	164 x 228 ± 1	173.86 x 237.89 ± 0.01
M2	Infinito	--	30.17 ± 0.01	--	Zerodur	160 x 226 ± 1	169.86 x 235.87 ± 0.01
M3	Infinito	--	35.22 ± 0.01	--	Zerodur	160 x 224 ± 1	169.84 x 235.81 ± 0.01
L2	437.450 ± 0.025	-257.500 ± 0.025	33.78 ± 0.01	3.85 ± 0.02	CaF ₂	173 ± 1	179.18 ± 0.01
L3	-177.22 ± 0.02	-437.47 ± 0.04	10.050 ± 0.005	14.26 ± 0.02	S-FTM16	152 ± 1	162.59 ± 0.01
L4	-146.73 ± 0.02	-140.77 ± 0.02	13.06 ± 0.02	4.20 ± 0.02	Infrasil	154 ± 1	167.02 ± 0.01
L5	291.01 ± 0.02	Infinito	18.275 ± 0.005	3.00 ± 0.02	BaF ₂	147 ± 1	153.56 ± 0.01
Diafragma de apertura T35	--	--	--	--	--	81.80 ± 0.15	
Diafragma de apertura T22	--	--	--	--	--	96.38 ± 0.15	
L6	420.225 ± 0.022	138.05 ± 0.02	10.06 ± 0.02	14.75 ± 0.02	S-FTM16	115 ± 1	139.97 ± 0.01
L7	158.49 ± 0.025	-1324.30 ± 0.25	26.64 ± 0.01	2.75 ± 0.02	BaF ₂	131 ± 1	143.43 ± 0.01
L8	291.03 ± 0.02	Infinito	18.36 ± 0.05	3.00 ± 0.02	Infrasil	132 ± 1	150.02 ± 0.01
PIL	119.71 ± 0.01	548.60 ± 0.01	22.08 ± 0.02	3.76 ± 0.02	ZnSe	114 ± 1	122.08 ± 0.01
Filtro	Plana	Plana	< 8.5	< 8.5	Infrasil	> 113.3	< 122.00
L9	-116.31 ± 0.03	251.77 ± 0.03	30.85 ± 0.05	48.72 ± 0.02	Infrasil	110 ± 1	129.99 ± 0.01

Tabla C–12: Parámetros de los componentes ópticos del diseño óptico construido a temperatura ambiente.

Las “no conformidades” mayores afectaron a tres lentes: L1, L5 y L7.

- L1: Debido a un defecto en el pulido de la lente para eliminarlo hubo que retirar material y repulir con lo que el grosor de la lente se redujo en 0.4 mm, y la consecuente reducción en el espesor en el borde y su implicación en los chaflanes.
- L5 y L7, ambas de BaF₂, tuvieron muchos problemas, por un lado en la fabricación misma de la lente, y por otro la de los chaflanes.

Respecto a la fabricación de la lente, debido a la baja dureza del material, el fabricante no pudo alcanzar el grosor requerido quedando ambas lentes con espesor menor, en el caso de L5 de casi 0.5 mm, llegando hasta casi 1 mm menor en el caso de L7, y la consecuente disminución del espesor en el borde. La segunda superficie de L5, además no cumplía la especificación de calidad de superficie. Afortunadamente se pudieron absorber todos estos problemas reoptimizando los espacios entre lentes y gracias a que otras lentes cumplían con mucho margen las especificaciones de calidad de superficie, también se pudo compensar esa no conformidad.

Pero la finalización de los chaflanes en estas dos lentes también presentaban problemas pues el fabricante reportó que se producían unas esquirlas justo en el filo del chaflán con la superficie óptica, que conllevó incluso la modificación del contrato con el fabricante (recordar sección 5.1.1) para su aceptación final tras criogenizado en sus correspondientes monturas ópticas.

La Tabla C-13 muestra los valores medios y mínimos de la transmitancia y reflectividad de los recubrimientos construidos. Los valores medios son los que se han introducido en *Zemax* para la estimación de la transmisión del sistema construido.

Las "no conformidades" (en rojo en la tabla) en el recubrimiento de la ventana de entrada del criostato y en la L8, respecto al mínimo de transmisión se produce cerca de las 2.5 μm con lo que no afectan a la transmisión del sistema en la banda fotométrica K_s .

Componente	Material	Transmitancia construida por superficie (%)	
		Media (> 98.5 %)	Mínima (>98 %)
Ventana del criostato	Infrasil	99.03	97.15
		99.03	97.15
L1, L4, L9	Infrasil	99.21	98.66
		99.02	98.28
L2	CaF ₂	99.15	98.60
		99.21	98.46
L3, L6	S-FTM16	99.04	98.41
		99.15	98.59
L5, L7	BaF ₂	98.71	98.00
		98.81	98.15
L8	Infrasil	99.30	97.80
		99.18	97.78
Componente	Material	Reflectancia construida (%)	
M1, M2, M3	Au protegido	Media (> 97 %)	Mínima (>95%)
		97.57	96.20

Tabla C-13: Transmitancia de los recubrimientos antirreflejantes ópticos construidos y su especificación para fabricación.

El cambio de temperatura de trabajo del instrumento, tras las pruebas de criogenia en el criostato de PANIC, se conoce en febrero de 2011, como ya se ha mencionado. Las nuevas y reales temperaturas de trabajo de los distintos elementos ópticos son: toda la óptica a 95 K, los filtros y la PIL a 100 K, y la ventana de entrada al criostato a temperatura ambiente.

Para esa fecha, todos los componentes ópticos, lentes y ventanas, se encuentran ya fabricados y aceptados (excepto la PIL y los filtros), por lo que el diseño óptico realizado para 80 K ha de ser adaptado a las nuevas temperaturas de trabajo. Para ello, la doctoranda, vuelve a generar los modelos de los vidrios para el índice de refracción y para el coeficiente de expansión térmica, esta vez, para los materiales de las lentes y el aluminio a 95 K y para Infrasil (filtros) y ZnSe (PIL) a 100 K.

Con los datos medidos por los fabricantes a temperatura ambiente de los componentes ya construidos se calculan los nuevos valores en frío. La siguiente Tabla C-14 muestra los valores usados para el CTE entre 293 K y 95 K, y entre 293 K y 100 K.

Material	CTE _{int} ($\Delta L/L$ %)	T _f (K)	CTE _{eq} ($10^{06} K^{-1}$)	Fuente
Al 5083-T6/AlMg4.5Mn	- 0.371	95	18.74	(Material Properties: 5083 Aluminium)
BaF ₂	- 0.3020	95	15.25	(Feldman, Horowitz, Waxler, & Dodge, 1978)
CaF ₂	-0.2874	95	14.52	(Feldman, Horowitz, Waxler, & Dodge, 1978)
Infrasil	- 0.0016	95	0.082	(Devices, 2006)
S-FTM16	- 0.1525	95	7.70	(Brown, Epps, & Fabricant, 2004)
Infrasil	- 0.0019	100	0.098	(Devices, 2006)
ZnSe	- 0.1125	100	5.83	(Feldman, Horowitz, Waxler, & Dodge, 1978)

Tabla C-14: Coeficientes de expansión térmica calculados para el rango de temperatura entre 293 K y la temperatura de trabajo correspondiente indicada.

Las longitudes de los todos los elementos a su temperatura de trabajo se calculan mediante la siguiente ecuación:

$$L_{95/100} = L_{293} (1 + \text{CTE}_{\text{int}}) \quad [\text{C.3}]$$

Se introducen en el modelo frío los parámetros de las lentes a la nueva temperatura de trabajo, así como los nuevos modelos de vidrios para el índice de refracción. Se re-optimiza el diseño óptico estableciendo como variable tan solo los espacios de separación entre lentes, ya que el resto de parámetros es ahora fijo al estar todos los elementos ópticos construidos. Estos nuevos espacios entre lentes se iteran con el equipo mecánico para que éste lo tenga en cuenta en la especificación detallada de la fabricación de los barriles de las lentes.

En todas las simulaciones del sistema construido, también se han introducido los parámetros de los filtros de ciencia construidos.

Tenidas en cuenta todas las consideraciones explicadas, se presenta en la siguiente Tabla C-15 el modelo óptico construido en sus condiciones reales de trabajo.

El redondeo de los parámetros presentados se ha realizado en base a la precisión experimental en caliente de la determinación de las distintas magnitudes, éstas se trasladan a frío. Del valor en frío así obtenido para la simulación en *Zemax* se han considerado: los radios de curvatura han sido redondeados hasta la diezmilésima de mm, la separación entre componentes hasta la milésima de mm y los espesores de lentes y las aperturas hasta la centésima de mm.

Componente	Radio de Curvatura (mm)	Espesor o Separación (mm)	Material	Diámetro (mm)
Interfaz telescopios T22/T35	Infinito	90.03 / 219.67	Aire	296.98/303.83
Ventana del criostato	Infinito Infinito	20.06	Infrasil	329.5
Espacio entre componentes		377.828	Vacío	-
L1	443.7428 Infinito	27.022	Infrasil_95K	255.09
Espacio entre componentes		38.998	Vacío	-
Diafragma de campo	--	--	Aluminio_95K	158.21 × 158.21
Espacio entre componentes		146.928	Vacío	
M1	Infinito	30.14	Zerodur	173.86 x 237.89
Espacio entre componentes		255.188	Vacío	-
M2	Infinito	30.17	Zerodur	169.86 x 235.87
Espacio entre componentes		275.194	Vacío	
M3	Infinito	35.22	Zerodur	169.84 x 235.81
Espacio entre componentes		124.302	Vacío	-
L2	436.1928 -256.7599	33.686	CaF ₂ _95K	178.67
Espacio entre componentes		32.690	Vacío	-
L3	-176.9497 -436.8027	10.035	S-FTM16_95K	162.34
Espacio entre componentes		19.829	Vacío	-
L4	-146.7276 -140.7627	13.060	Infrasil_95K	167.02
Espacio entre componentes		1.539	Vacío	-
L5	290.1332 Infinito	18.220	BaF ₂ _95K	153.10
Espacio entre componentes		55.694	Vacío	-
Diafragma de apertura T35	--	--	Aluminio_95K	81.50
Espacio entre componentes		35.303	Vacío	-
Diafragma de apertura T22	--	--	Aluminio_95K	96.02
Espacio entre componentes		70.873	Vacío	-
L6	419.5840 137.8394	10.042	S-FTM16_95K	139.76
Espacio entre componentes		25.823	Vacío	-
L7	158.0114 -1320.3008	26.563	BaF ₂ _95K	143.00
Espacio entre componentes		12.526	Vacío	-
L8	291.0253 Infinito	18.364	Infrasil_95K	150.01
Espacio entre componentes		81.432	Vacío	-
PIL	119.5733 547.9868	22.055	ZnSe_100K	121.94
Espacio entre componentes		39.484		-

Componente	Radio de Curvatura (mm)	Espesor o Separación (mm)	Material	Diámetro (mm)
Filtro	Infinito Infinito	8.39	Infrasil_100K	122.00
Espacio entre componentes		40.111	Vacío	-
L9	-116.3081 251.7659	30.849	Infrasil_95K	129.99
Espacio entre componentes		18.644	Vacío	-
Detector (2048·2+167)	Infinito	--	--	76.73 × 76.73

Tabla C-15: Valores de los componentes del sistema óptico construido en sus condiciones de trabajo, temperatura 95 K para la óptica y 100 K para los filtros y la PIL.

En la Tabla 6-2, dentro del capítulo 6 de resultados, se han listado las prestaciones obtenidas del diseño óptico construido de PANIC trabajando en ambos telescopios.

Y a continuación se resumen la prestación por banda para ambos telescopios en la Tabla C-16 y la Tabla C-17, donde para el rango espectral de cada banda ya se considera el FWHM de los filtros construidos (Tabla 6-4).

Rango espectral		Longitud focal (mm)	F#	Escala de placa (arsec/px)	D_{EE80}	Distorsión (%)
Banda	(μm)					
Policromático	0.821-2.369	8248	3.743	0.445	26.38 μm = 1.47 px	1.33
Z	0.821-0.927	8240	3.742	0.445	16.37 μm = 0.91 px	1.36
Y	0.971-1.075	8242	3.742	0.445	15.74 μm = 0.87 px	1.36
J	1.169-1.326	8244	3.743	0.445	18.28 μm = 1.02 px	1.35
H	1.495-1.780	8248	3.743	0.445	22.94 μm = 1.27 px	1.33
K_s	1.986-2.314	8252	3.744	0.445	29.63 μm = 1.65 px	1.31

Tabla C-16: Prestaciones del diseño óptico construido de PANIC en el T22 evaluadas para cada banda fotométrica.

Rango espectral		Longitud focal (mm)	F#	Escala de placa (arsec/px)	D_{EE80}	Distorsión (%)
Banda	(μm)					
Policromático	0.821-2.369	16377	4.674	0.2238	30.99 μm = 1.72 px	1.38
Z	0.821-0.927	16362	4.672	0.2238	21.79 μm = 1.21 px	1.41
Y	0.971-1.075	16366	4.672	0.2238	22.29 μm = 1.24 px	1.41
J	1.169-1.326	16370	4.673	0.2238	24.28 μm = 1.35 px	1.40
H	1.495-1.780	16375	4.674	0.2238	28.45 μm = 1.58 px	1.38
K_s	1.986-2.314	16384	4.675	0.2238	34.94 μm = 1.94 px	1.35

Tabla C-17: Prestaciones del diseño óptico construido de PANIC en el T35 evaluadas para cada banda fotométrica.

D. EL SIMULADOR DE ESTRELLA DE PANIC

Se detallan a continuación los datos esenciales del diseño óptico del Simulador de Estrella (SS).

Esta herramienta fue diseñada *ad hoc* para la verificación de la calidad de imagen de PANIC en laboratorio, y también ha sido diseñada e integrada por la doctoranda.

Es usada tanto antes de su transporte (sección 5.2.7), como después de él (sección 5.3.1), y puede ser usada siempre que se quiera verificar la calidad de imagen del instrumento en laboratorio.

D.1. DISEÑO ÓPTICO DEL SS

Para verificar la calidad de imagen en laboratorio es necesario producir un objeto lo más puntual posible y localizado en el plano focal del telescopio, que simularía una estrella a través del telescopio entrando en PANIC. En PANIC dicho plano focal se encuentra dentro del criostato del instrumento, localizado detrás de L1. Por tanto, una vez el instrumento en condiciones de operación no se puede acceder a dicho plano físicamente para modificar la posición de la estrella o su espectro.

De este modo, la función del SS es la de producir un punto de luz en el plano focal del telescopio, y teniendo dicho punto un tamaño menor a la PSF del telescopio en su plano focal ideal. Usando el modelo óptico construido de PANIC (apéndice C, sección C.4) y analizando el tamaño de la imagen en el plano focal del telescopio, se obtiene que para todas las bandas fotométricas el mejor radio rms es del orden de 25 μm para el T22 y de 20 μm para el T35. Usando la ecuación [3.20] resulta en un tamaño de imagen de un FWHM = 59 μm . La Tabla D-1 resume los requerimientos básicos de este sistema a diseñar.

Parámetro	Requerimiento	SS
Modo de operación	Imagen, en todo el campo de visión	✓
Proyección imagen	En plano focal del telescopio, detrás de L1	✓
Simulación telescopio en su plano focal ideal	F# = 8 (T22) y F# = 10 (T35) FWHM imagen \leq 59 μm	✓ ✓
Rango espectral	(0.85 – 2.3) μm	✓
Sistema	Externo al criostato Iluminación a través de la ventana del criostato Distancia EW al FP = 463.9 mm (a 95 K)	✓ ✓ ✓
FoV	Capaz de cubrir el FoV de PANIC	✓
Coste	Minimizar Usar componentes comerciales cuando sea posible	✓

Tabla D-1: Requerimientos básicos del SS.

La solución adoptada es un sistema óptico que reimagina la salida de una fibra monomodo en el plano focal del telescopio a través de la ventana del criostato de PANIC y de L1. Con el objetivo de proyectar una imagen de la salida de la fibra lo más pequeña posible, se eligen fibras monomodo como objeto, ya que éstas poseen el tamaño más pequeño de núcleo.

En la Imagen D-1 se muestra su esquema óptico realizado en *Zemax*.

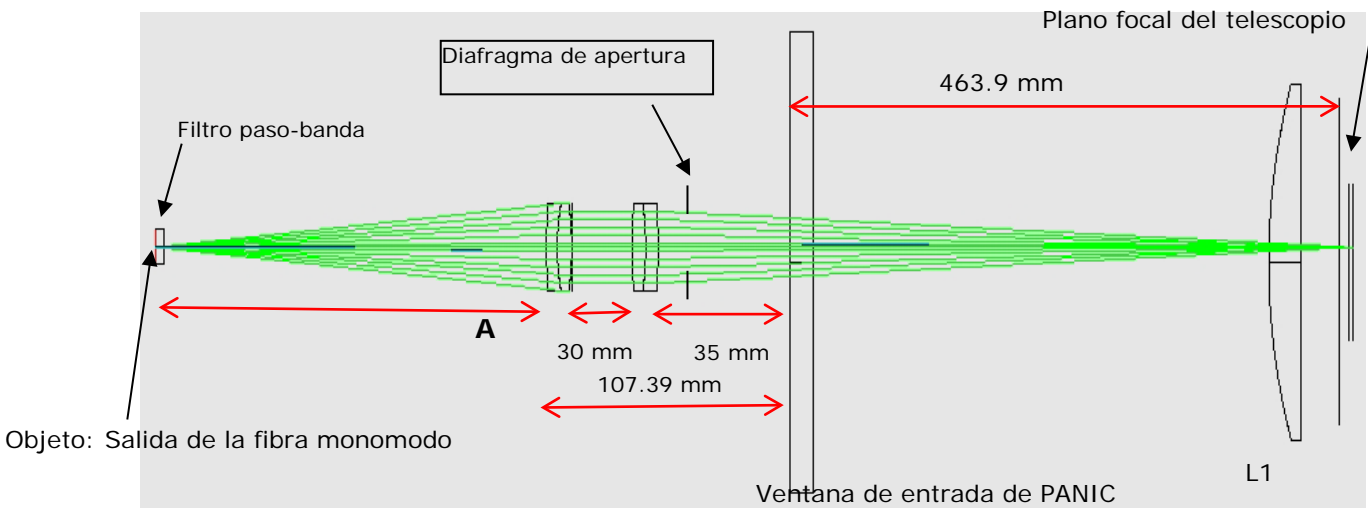


Imagen D-1: Esquema óptico del SS compuesto por dos dobletes acromáticos.

El diseño óptico está formado por los siguientes componentes:

1. **Objeto:** Salida de una fibra óptica monomodo iluminada con la longitud de onda adecuada. Para construir el objeto se utiliza (Imagen D-2):
 - o Una fuentes de iluminación halógena, LS-1 de la empresa "*Ocean Optics*" de espectro continuo en el rango de 360 a 2500 nm, alimentada a 12 V, y con una temperatura de color de 3100 K.
 - o Si es necesario, la intensidad de la lámpara halógena se puede atenuar mediante la adición de filtros neutros en una posición antes de la entrada a la fibra.
 - o Fibra óptica monomodo acoplada a la salida de la lámpara halógena.

La salida de la fibra no es exactamente un objeto puntual. La irradiancia a su salida se caracteriza por el denominado diámetro del campo del modo (en inglés *mode field diameter*), ω_0 , que mide el diámetro del círculo en el que la intensidad disminuye hasta $1/e^2$. Asumiendo que la distribución de dicha irradiancia es una gaussiana el parámetro sigma de ésta viene dado por:

$$\sigma_0 = \omega_0/4 \quad [D.1]$$

Para cubrir todo el rango espectral se utilizan las siguientes dos fibras, que fueron adquiridas en *Thorlabs Inc.*, así como sus correspondientes conectores de acople a la entrada y a la salida:

- P1-980A-FC-5: rango 980 a 1550 nm, $\sigma_0 \sim 6 \mu\text{m} @ 980 \text{ nm}$.
 - P1-2000-FC-5: rango 1700 a 2300 nm, $\sigma_0 \sim 13 \mu\text{m} @ 1996 \text{ nm}$.
- o A la salida de la fibra se interponen en el camino óptico un filtro de paso de banda infrarrojo para seleccionar el rango espectral deseado. Los filtros utilizados tienen las siguientes longitudes de onda central y FWHM:
 - λ_c/FWHM : 850/10 nm; 1000/10 nm; 1250/10 nm; 1600/10 nm y 2129/16 nm.

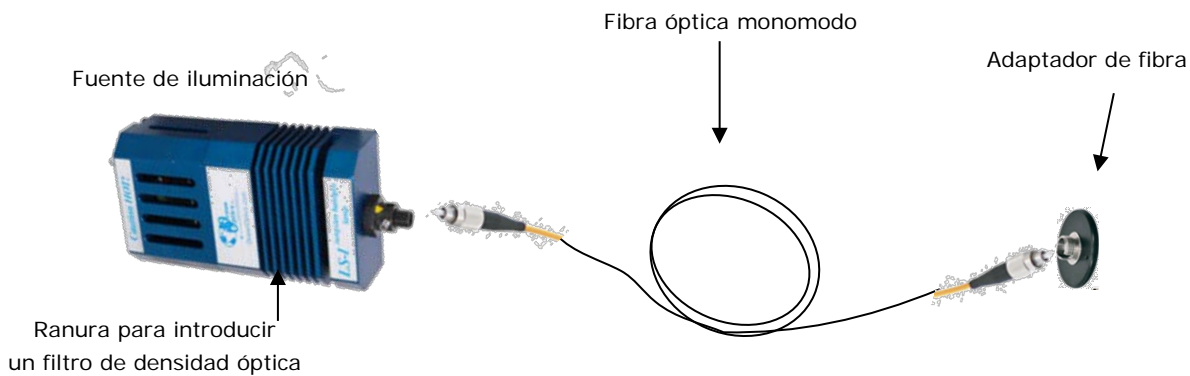


Imagen D-2: Esquema del sistema de iluminación del SS para producir el objeto.

2. Óptica reimaginadora: compuesta por dos dobletes acromáticos comerciales de alta calidad óptica (ambos limitados por difracción) y que reimaginan la salida de la fibra (ya filtrada en longitud de onda) en el plano focal del telescopio con una magnificación de 1. El diseño del sistema óptico está limitado por difracción por lo que no introduce aberraciones extra y proporciona la mejor imagen de la salida de la fibra en estas condiciones de trabajo.

El sistema reimaginador está formado por:

- Un primer doblete acromático de focal 354.9 mm, apertura 63.5 mm y sin recubrimiento antirreflejante, adquirido en *Edmund optics*, referencia 31402.
 - Un segundo doblete acromático de focal 476.42 mm, apertura 63.5 mm y sin recubrimiento antirreflejante, adquirido en *Edmund optics*, referencia 42817.
 - Un diafragma de apertura localizado a la salida del segundo acromático de diámetro:
 - 57.0 mm para simular un $F\#=8$ (T22).
 - 45.7 mm para simular un $F\#=10$ (T35).
3. Interfaz de posicionamiento que permite instalar el SS paralelo a la línea de visión de PANIC en el puerto de entrada del TA, delante de la ventana de entrada del criostato (Imagen 5-62). Además esta interfaz mecánica incorpora una serie de patrones de agujeros que posibilita la instalación del al SS en diferentes posiciones del plano perpendicular al eje óptico para así escanear diferentes posiciones en el campo de visión y por tanto todo el plano focal del detector (un esquema del diseño mecánico se muestra en la Imagen D-4 y la pieza fabricada en el MPIA a la izqda. en Imagen 5-62).

El FoV de PANIC se muestrea en cuatro posiciones dentro de cada cuadrante del FPA. En la Tabla D-2 se resumen estas posiciones, donde se presentan las localizaciones de las cuatro posiciones para uno de los cuadrantes con respecto al centro del FPA que se toma como origen de coordenadas. Hay dos tipos de localizaciones, la primera la posición en la que se ha de instalar el SS en su interfaz al TA y la segunda, la posición conjugada en el detector de PANIC, tanto en mm como en px.

Las localizaciones de los demás cuadrantes se deducen por la simetría de la configuración. Para visualizarlo se indica en la Imagen D-3.

La localización del muestreo del campo se ha realizado de tal forma que se explore todo el FoV con el menor número de puntos posible pero además se pueda medir en puntos que podrían presentar asimetrías en la imagen. Las posiciones tipo 1 se encuentran localizadas en la frontera entre dos canales de lectura del detector, en cambio todas las demás se encuentran en medio de un canal de lectura (el detector tiene 32 px por canal).

Posición	Objeto X, Y coordenadas en el TA	Imagen X, Y coordenadas en el detector	
	(mm)	(mm)	(px)
Centro EW	(0 ; 0)	(0 ; 0)	(0 ; 0)
1	(11.7 ; 11.7)	(5.5 ; 5.5)	(306 ; 306)
2	(59.8 ; 12.2)	(28.0 ; 5.7)	(1556 ; 317)
3	(12.2 ; 58.5)	(5.7 ; 27.4)	(317 ; 1522)
4	(58.2 ; 58.2)	(27.4 ; 27.4)	(1522 ; 1522)

Tabla D-2: Localización del SS en su interfaz mecánica al TA y su correspondencia en el mosaico de detectores de PANIC.

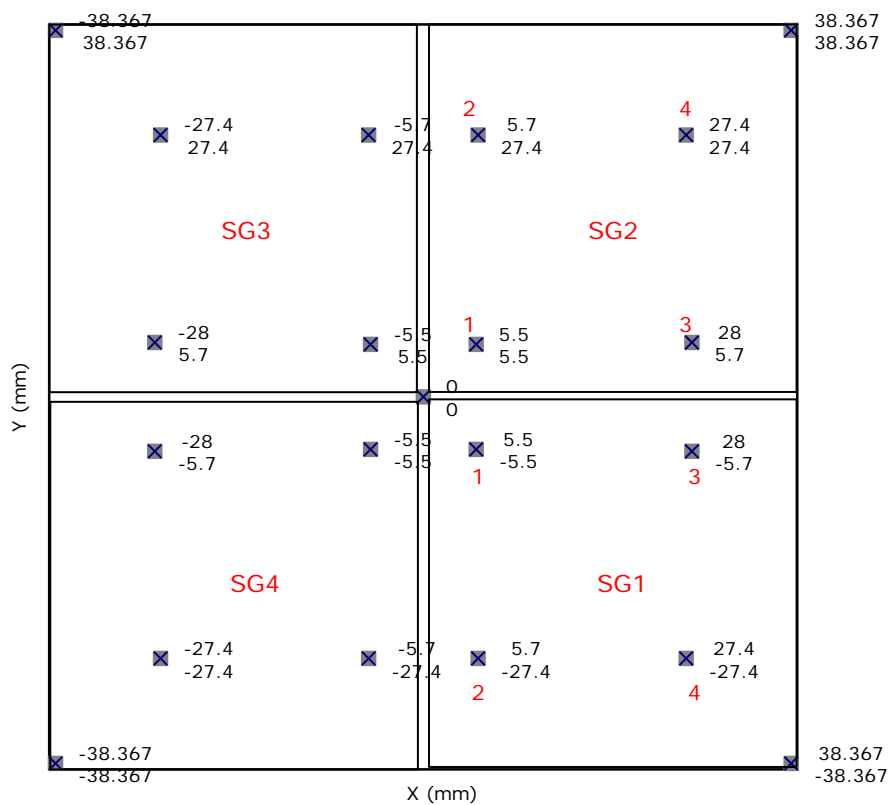


Imagen D-3: Localización en el detector de PANIC de los puntos del FoV muestreados con el SS.

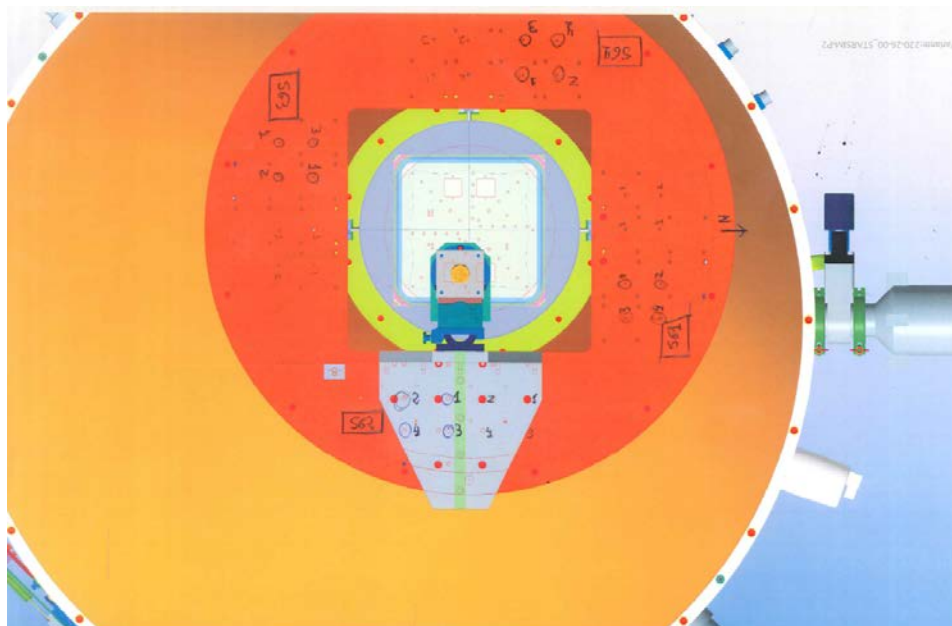


Imagen D-4: Vista superior del diseño mecánico de la interfaz para el simulador de estrella.

4. Sistema de enfoque: Mediante la variación de la distancia **A** (Imagen D-1) el SS permite ser reenfocado entre las diferentes bandas del rango espectral, y entre las distintas posiciones de muestreo del campo de visión explorado.

Dicha distancia se puede variar mediante un tornillo micrométrico instalado en la posición de la salida de la fibra (ver dcha. en Imagen 5-63).

La distancia inicial **A** para cada banda y posición se determina con el modelo óptico del SS realizado en *Zemax*. La Tabla D-3 condensa la configuración del SS en función de la banda espectral y la posición dentro del FoV a medir.

Lámpara halógena + Filtro OD	Fibra	SS Filtro	PANIC Filtro	Distancia A (mm)			
				Posición 1	Posición 2	Posición 3	Posición 4
Filtro teflón delgado	980-1550 nm	850/10	Z	333.5	333.85	333.83	334.19
Filtro teflón grueso	980-1550 nm	1000/10	Y	335.00	335.35	335.33	335.68
Filtro teflón grueso	980-1550 nm	1250/10	J	337.84	338.18	338.16	338.51
Filtro teflón grueso + Filtro OD=1	980-1550 nm	1600/10	H	343.18	343.50	343.49	343.83
Filtro teflón grueso + Filtro OD=2	1700-2100 nm	2129/16	Ks	353.32	353.62	353.61	353.94
Filtro teflón grueso + Filtro OD=2	1700-2100 nm	2129/16	H ₂	353.84	354.14	354.13	354.46

Tabla D-3: Configuración del SS en función de la banda espectral y la localización dentro del FoV de las medidas.

Con PANIC en posición de operación (cenital) y en criogenia, se procede a la ejecución de las medidas mediante el siguiente procedimiento y usando la tabla anterior:

- Para cada banda fotométrica de PANIC se realizan las medidas en las 16 posiciones del FoV.

- Se introduce el filtro de paso de banda correspondiente a la banda espectral que se vaya a medir.
- Se configura el SS a la distancia **A** predicha por el modelo óptico, según la posición a medir, 1, 2, 3 ó 4.
- Se instala el SS en su interfaz mecánica de posicionamiento en la correspondiente posición.
- Se acopla la correspondiente fibra dependiendo del rango espectral.
- Se introduce el filtro correspondiente en la rueda de filtros de PANIC.
- Dependiendo de la intensidad de la imagen obtenida en PANIC, se usa o no un filtro neutro de OD adecuada.
- Se hace una serie de foco, partiendo de la posición nominal A, con el objeto de determinar la mejor posición A para cada exposición (se muestra un ejemplo en la Imagen D-5).

Para ello se mide el FWHM de la imagen obtenida en PANIC con la herramienta de software realizada por el equipo de ingenieros de software de PANIC. Esta herramienta denominada *QuickLook* (Ibáñez Mengual, 2017) hace un ajuste gaussiano para la determinación del mejor foco en una serie de focal.

Con el SS se efectúa una serie de foco de 6 valores hasta un 2σ alrededor de la mediana (en la Imagen D-6 se muestra dicho ajuste para el ejemplo expuesto).

- La nueva mediana obtenida del ajuste se toma como el FWHM medido de la imagen, y la desviación estándar como el error de esta determinación.
- Estas 16 exposiciones se repiten para 6 bandas filtros de ciencia de PANIC, incluido el estrecho, H_2 .

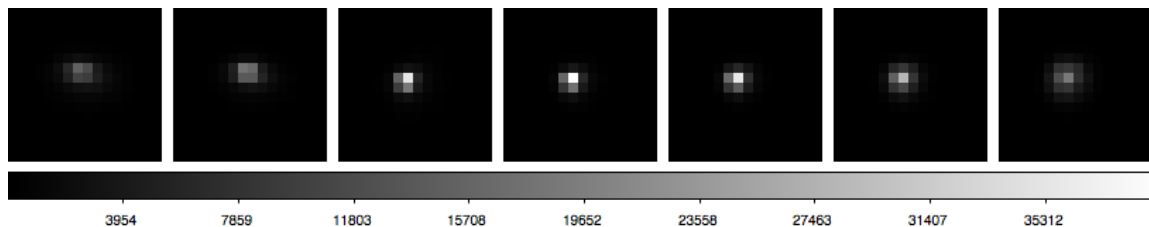


Imagen D-5: PSF de las imágenes obtenidas para el SG1, posición 2 con el filtro K_S .

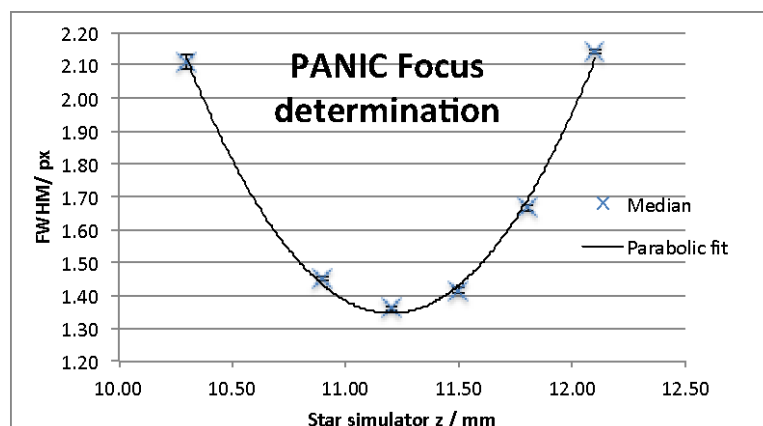


Imagen D-6: Ejemplo del ajuste parabólico de la serie de foco del SG1, posición 2.

D.2. PRESTACIÓN ESPERADA POR EL SS

El diseño óptico del SS incluye la ventana de entrada del criostato de PANIC así como L1. De acuerdo con el modelo en *Zemax* del SS, para un objeto puntual y $F\#=8$, el tamaño radio rms de la imagen que este sistema proyecta en el plano focal del telescopio es siempre menor a **25 μm** , para todas las bandas espectrales de PANIC. En la Imagen D-7 se muestra como ejemplo la imagen de este modelo para el filtro H₂ y para las cuatro posiciones del FoV propuestas. Se observa que el tamaño rms de las imágenes es muy cercano al del disco de *Airy* (círculo negro superpuesto).

De modo que, a priori, el modelo óptico del sistema, compuesto por el simulador de estrella más el sistema óptico de PANIC, producirá un tamaño del radio rms en el detector de PANIC menor de **12 μm** (magnificación de PANIC Tabla 6–2).

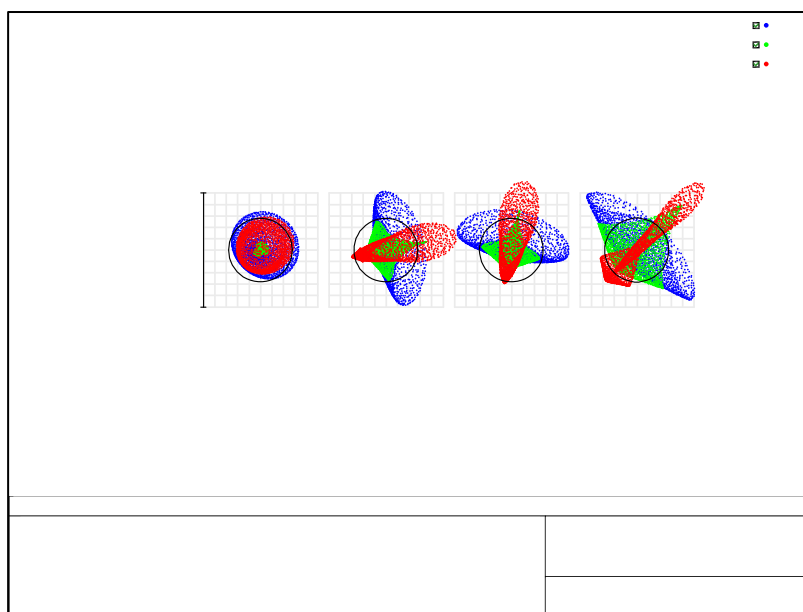


Imagen D-7: Diagrama de puntos del modelo SS hasta el plano focal del telescopio para el filtro H₂ y para las cuatro posiciones en el FoV.

Se realiza un modelo óptico que incluye los diseños del SS y el de PANIC construido, teniendo en cuenta las bandas espectrales de trabajo y las posiciones dentro del FoV y se evalúa el tamaño de la imagen correspondiente. Se considera para el SS la configuración con $F\#=8$ (simulación para las condiciones del T22) por ser el caso más desfavorable. Cabe decir que estos tamaños son independientes del cuadrante, por ello tan solo se presentan las cuatro posiciones por cuadrante.

La Tabla D–4, columna “Modelo óptico SS+PANIC”, resume los valores esperados para un objeto puntual.

El núcleo de la fibra no es un objeto puntual, con lo que se ha de convolucionar su tamaño con el de la imagen predicha por el modelo óptico. Para ello se considera que el tamaño de la imagen es suma cuadrática del tamaño de la fibra (ecuación [D.1]) y de la imagen del modelo (radio rms del modelo):

$$\sigma_{imagen} = \sqrt{\sigma_0^2 + \sigma_{modelo}^2} \quad [D.2]$$

La Tabla D–4, columna “Convolución Fibra+Modelo óptico”, muestra entonces los valores esperados para cada banda espectral y posición, teniendo en cuenta el tamaño del núcleo de la fibra óptica.

El tamaño de la imagen en laboratorio se mide en términos del FWHM. Por tanto, se traducen estos valores esperados a FWHM mediante la ecuación [3.17] y se expresa en px, teniendo en cuenta que el tamaño del pixel es de 18 μm . En la Tabla D–5 se presentan estos valores tanto en términos del radio rms como de FWHM. Así mismo, para la comparación de las medidas experimentales con este modelo se toma como valor del tamaño de la imagen por cuadrante la media del FWHM esperado de las cuatro posiciones y como error la desviación estándar entre las cuatro posiciones (columna “Media por cuadrante”).

SS + PANIC Filtro	Fibra	ω_0 (μm)	Modelo óptico SS+PANIC Radio rms (μm)				Convolución Fibra+Modelo óptico Radio rms (μm)			
			Pos. 1	Pos. 2	Pos. 3	Pos. 4	Pos. 1	Pos. 2	Pos. 3	Pos. 4
850/10 + Z	980-1550 nm	4.62	4.75	9.31	9.01	14.39	4.89	9.38	9.08	14.44
1000/10 + Y	980-1550 nm	5.86	6.46	9.90	9.63	14.86	6.62	10.01	9.74	14.93
1250/10 + J	980-1550 nm	7.94	8.02	10.58	10.34	15.36	8.26	10.76	10.53	15.49
1600/10 + H	980-1550 nm	10.84	10.03	11.83	11.62	16.21	10.39	12.14	11.93	16.43
2129/16 + K _s	1700-2100 nm	13.00	9.71	11.10	10.91	15.59	10.24	11.57	11.38	15.93
No filtro + H ₂	1700-2100 nm	13.00	10.84	12.09	11.91	16.30	11.32	12.52	12.35	16.62

Tabla D–4: Tamaño del radio rms esperado por el modelo óptico del SS+PANIC incluyendo el tamaño del núcleo de la fibra.

Banda fotométrica	Convolución Fibra+Modelo óptico								
	Radio rms (μm)				FWHM (px)				FWHM (px)
	Pos. 1	Pos. 2	Pos. 3	Pos. 4	Pos. 1	Pos. 2	Pos. 3	Pos. 4	Media por cuadrante
Z	4.89	9.38	9.08	14.44	0.64	1.23	1.19	1.89	1.24 ± 0.51
Y	6.62	10.01	9.74	14.93	0.87	1.31	1.27	1.95	1.35 ± 0.45
J	8.26	10.76	10.53	15.49	1.08	1.41	1.38	2.03	1.48 ± 0.40
H	10.39	12.14	11.93	16.43	1.36	1.59	1.56	2.15	1.67 ± 0.34
K_s	10.24	11.57	11.38	15.93	1.34	1.51	1.49	2.08	1.64 ± 0.30
H₂	11.32	12.52	12.35	16.62	1.48	1.64	1.62	2.17	1.73 ± 0.30

Tabla D–5: Tamaño de la imagen en términos de FWHM esperado por modelo óptico del SS+PANIC incluyendo el tamaño del núcleo de la fibra.

E. INSTRUMENTOS DE MEDIDA EN LABORATORIO

Con respecto a los principales equipos de medida usados en el AIV de PANIC se realiza aquí un listado de los mismos, se describen brevemente y se destacan sus características esenciales.

E.1. AUTOCOLIMADOR: ELCOMAT 3000

Este instrumento óptico se usa para medir ángulos sin contacto.

El autocolimador proyecta un haz colimado que se refleja por el objeto plano problema del cual se quiere medir su perpendicularidad a la línea de visión. El haz reflejado vuelve al autocolimador con un desplazamiento a partir del cuál se puede calcular el ángulo de inclinación de la superficie problema.

El modelo usado en el AIV de PANIC y sus características son:

Autocolimador electrónico: ELCOMAT 3000

Medición de ángulo: simultánea en dos ejes

Rango de medida: ± 1000 arcsec

Precisión: ± 0.1 arcsec (dentro de los 20 arcsec de rango)

± 0.25 arcsec en todo el rango

En la Imagen 5-28 se puede ver este autocolimador durante el alineado en caliente de la estructura de los espejos de doblado.

E.2. ESPECTROFOTÓMETRO: UV/VIS/NIR VARIAN

Un espectrofotómetro es un instrumento que sirve para medir, en función de la longitud de onda, la relación entre valores de una misma magnitud fotométrica, relativos a dos haces de radiación, uno que pasa por la muestra y otro que es el de referencia.

Tiene la capacidad de proyectar un haz de luz monocromática en ambos haces mediante un sistema monocromador. Con él, se puede medir la cantidad de luz absorbida, reflejada o transmitida por la muestra problema.

Espectrofotómetro de doble haz electrónico: UV/VIS/NIR Varian Cary 5000

Intervalo espectral de medida: 190 a 3300 nm

Precisión de la medida: ± 0.1 nm (VIS, 350 a 800 nm)

± 0.4 nm (NIR, 800 a 3300 nm)

E.3. INTERFERÓMETRO: μ PHASE[®] FST H100

Este instrumento óptico se usa para medir con alta precisión la calidad de superficie de componentes ópticos (tanto de superficies planas -ventanas, espejos-, como con potencia -lentes, espejos-) en reflexión y frente de onda de sistemas ópticos en transmisión. La técnica de medida se basa en la interferencia del haz emitido por el

interferómetro y el haz recibido del componente problema del cual se desea determinar su calidad óptica.

El usado en el AIV de PANIC es el siguiente:

Interferómetro electrónico: μ Phase[®] FST H100

Técnica de medida: Interferómetro *Twyman-Green* con desplazamiento de fase

Longitud de onda de trabajo: 632.8 nm

Diámetro haz colimado: 150 mm

Error de la medida: $\leq \lambda/30$ (21 nm ó 0.07 *fringes*)

Este aparato se ha mostrado en muchas imágenes de esta memoria. Por ejemplo en la Imagen 5-14 se puede ver este interferómetro y en la Imagen 5-15 el aspecto de los resultados del frente de onda que puede medir.

E.4. TELESCOPIO DE MICRO-ALINEAMIENTO: MAT TAYLOR HOBSON

Un telescopio de micro-alineado (MAT, del inglés *Micro-Alignment Telescope*) es un aparato óptico que se usa para medir desplazamientos en el plano perpendicular a su línea de visión, así como ángulos con respecto a la misma de objetos lejanos.

Este telescopio se muestra en la Imagen 5-49 donde se encuentra instalado en un sistema que dispone de movimientos en cuatro grados de libertad: X, Y, inclinación X e inclinación Y, que permite coalinearlo con el eje determinado por las dianas de referencia.

Sus características se resumen a continuación:

Telescopio de micro-alineamiento: MAT *Taylor Hobson*

Rango de enfoque: 25 mm a infinito

Modos de operación: imagen directa y autocolimación

Modo imagen directa: Medición posición lateral de la diana

Precisión medida: $\pm \Lambda$ (dado por ecuación [5.1])

Modo autocolimación: Medición ángulo con respecto a la línea de visión

Precisión medida: $\pm \Sigma$ (dado por ecuación [5.2])

$$\Lambda = 0.0064 + d \cdot \tan^{-1}(3 \text{arcsec}) \quad (\text{E.1})$$

donde **0.0064 mm** es el error de la concentricidad del tubo del MAT, **3 arcsec** el error de su eje con respecto a la línea de visión, **d** es la distancia del MAT al objeto de medida, y Λ es el error de la medida obtenida. Para distancias por debajo de los 3 m, el error de la medida es menor de 50 μm .

$$\Sigma = \tan^{-1}\left(\frac{0.025}{d}\right) \quad (\text{E.2})$$

donde **0.025 mm** es el error de la concentricidad del MAT en autoreflexión. Para distancias en el rango que medimos en el alineado de PANIC, entre 0.75 y 3 m, el error es menor de 7 arcsec.

F. LÍNEA DE TRABAJO DEL PROYECTO

La siguiente Tabla F-1 muestra los hitos principales del desarrollo de este proyecto y que se han ido mencionando a lo largo de esta memoria de tesis. También resume la línea de trabajo de esta tesis.

Fecha/Periodo	Descripción
Noviembre 2004	Firma del Convenio CSIC-MPG respecto al Observatorio Hispano-Alemán de Calar Alto
Septiembre 2005	Decisión construcción del primer instrumento dentro del convenio
Octubre 2005 – Abril 2006	Estudio viabilidad nueva cámara: 3 soluciones presentadas.
Julio 2006	Decisión Comité Científico Asesor de CAHA: construcción monobrazo
Octubre 2006	Reunión de comienzo de proyecto PANIC
Octubre 2006 – Noviembre 2007	PDR del instrumento completo
Diciembre 2007 – Septiembre 2008	FDR de la Óptica
Diciembre 2007 – Diciembre 2009	FDR del instrumento
Noviembre 2008 – Abril de 2012	Fase de fabricación y aceptación de los distintos subsistemas
Noviembre 2008 – Mayo 2009	Definición detallada de lentes, espejos y ventana de entrada
Enero 2009	Firma del MoU, entre CAHA, IAA y MPIA
Mayo 2009 – Febrero 2010	Contrato: Fabricación Espejos de doblado
Mayo 2009 – Abril 2010	Contrato: Validación fabricación chaflanes de las lentes
Mayo 2009 – Mayo 2011	Contrato: Fabricación Ventana entrada criostato y Lentes L1 a L9
Mayo 2009 – Mayo 2010	Fabricación Ventana entrada criostato
Noviembre 2009	Evaluación luz difusa del pulido lentes en BaF ₂
Diciembre 2009 – Febrero 2010	Adquisición Ventana de salida del criostato de PANIC
Abril 2010	Ciclado criogénico en criostato de pruebas: validación diseño de la montura de los espejos de doblado y supervivencia recubrimiento oro protegido
Abril 2010 – Mayo 2010	Diseño y construcción del espejo auxiliar plano-paralelo para el alineado de la MS
Mayo 2010 – Agosto 2014	Fase de Alineado, Integración y Verificación
Mayo 2010	Espejos de doblado: interferogramas con recubrimiento y montura real
Mayo 2010	Estructura de espejos, MS: integración y alineado en condiciones estáticas
Mayo 2010 – Noviembre 2010	Diseño y fabricación de las dianas de alineado
Mayo 2010 – Mayo 2011	Finalización Lentes L1 a L9
Diciembre 2010	Primer ciclado criogénico del criostato de PANIC con elementos ópticos Primeras medidas de temperatura real de trabajo: no es posible conseguir 80 K Estructura de espejos: supervivencia espejos de doblado en sus monturas Ventana de entrada del criostato: supervivencia Ventana de salida del criostato: supervivencia Primera verificación del eje opto-mecánico en frío
Enero 2011 – Junio 2011	Ciclados criogénicos en criostato de pruebas para aceptación de: L1, L2, L3, L4, L6, L8 y L9. En montura "tipo SESO"
Febrero 2011	Determinación de la temperatura real de trabajo: lentes 95 K, filtros y PIL 100 K
Marzo 2011	Integración mecánica y electrónica de la unidad de ruedas de filtros
Mayo 2011 – Noviembre 2011	Contrato: Lente reimaginadora de pupila
Mayo 2011 – Febrero 2012	Contrato: Fabricación juego de filtros de ciencia
Mayo 2011 – Junio 2012	Alineado eje opto-mecánico, caliente, frío, y flexiones
Agosto 2011 – Septiembre 2011	Diseño, construcción e integración del Simulador de Estrella

Noviembre 2011	Ciclado criogénico en criostato: PIL en montura "tipo SESO" y testigo de su recubrimiento
Marzo 2012 – Mayo 2012	Recepción de las monturas reales de las lentes
Marzo 2012 – Abril 2012	Ciclados criogénicos en el criostato de pruebas en las monturas opto-mecánicas reales para aceptación de: L5 y L7 Ciclado de los testigos de recubrimiento de los filtros de ciencia
Mayo 2012 – Junio 2012	Integración y ajuste de todas las lentes en su montura individual
Junio 2012	Alineado de los barriles LM2 y LM3
Noviembre 2012 – Febrero 2014	Alineado del instrumento completo
Febrero 2013	Estructura de espejos, MS: verificación alineado en condiciones dinámicas
Junio 2013 – Agosto 2013	Diseño y fabricación del espejo auxiliar plano-paralelo (LM2) para el alineado el eje opto-mecánico de PANIC
Noviembre 2013	Integración del filtro de ciencia K_s y de la PIL en las ruedas de filtros Ciclado criogénico en PANIC para supervivencia de filtros y PIL : rotura del filtro K_s
Diciembre 2013 – Mayo 2014	Estudio casusas del daño en los filtros durante el criogenizado Eliminación del anillo metálico de los filtros en fábrica
Febrero 2014	Diseño y construcción de la máscara de foco
Marzo 2014 – Julio 2014	Ajuste del mosaico de detectores en su posición óptica de foco en PANIC
Agosto 2014	Recepción del nuevo filtro K_s Ciclado criogénico de todos los filtros sin anillo para su supervivencia
Septiembre 2014	Pruebas de calidad óptica en laboratorio antes del transporte
Septiembre 2014	Desmontaje y empaquetado
Octubre 2014	Transporte desde el MPIA a CAHA
Octubre 2014 – Marzo 2015	Fase de Alineado, Integración y Verificación en ambos telescopios
Octubre 2014	Recepción del instrumento en CAHA Reensamblaje del instrumento Pruebas de calidad óptica en laboratorio después de transporte
Noviembre 2014	Primera luz en el T22
Noviembre 2014 – Diciembre 2014	Comisionado en el T22
Marzo 2015	Comisionado en el T35
Enero 2016	Instalación del filtro estrecho Br-γ
Noviembre 2017	Acepción provisional de PANIC (pendiente del cambio del detector)
Agosto 2018	Orden de compra del nuevo detector para PANIC
Agosto 2018	Desmontaje de PANIC y transporte al MPIA

Tabla F-1: Línea de trabajo del proyecto.